

Analiza prijelaza topline u plaštu izmjenjivača topline shell&tube sa segmentnim pregradama

Čerkez, Mia

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:989998>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mia Čerkez

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

**Analiza prijelaza topline u plaštu izmjenjivača topline
tipa shell&tube sa segmentnim pregradama**

Mentor:

prof.dr.sc. Ivanka Boras, dipl. ing.

Student:

Mia Čerkez

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad radila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojoj mentorici prof.dr.sc. Ivanki Boras na ukazanoj podršci, razumijevanju, te pomoći.

Mia Čerkez



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomatske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mia Čerkez** Mat. br.: 0035204548

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza prijelaza topline u plaštu izmjenjivača topline tipa shell&tube sa segmentnim pregradama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Heat transfer analysis in the shell of heat exchanger type shell&tube with baffles**

Opis zadatka:

Prijelaz topline u plaštu izmjenjivača topline sa cijevnim snopom i segmentnim pregradama uključuje različite uvjete izmjene topline s obzirom na smjer strujanja fluida i geometrijske značajke konstrukcije. Za definiranu geometriju izmjenjivača topline i zadane ulazne parametre struja, potrebno je provesti analizu prijelaza topline u plaštu izmjenjivača, koristeći pristupe različitih autora te usporediti dobivene rezultate.

Ulazno stanje struje zraka u plaštu izmjenjivača topline definirano je podacima: maseni protok 1500 kmol/h; tlak 5 bar; ulazna temperatura 75 °C. Kroz cijevi cijevnog snopa struji 70 kg/s rashladne vode ulazne temperature 25 °C. Osnovna geometrija izmjenjivača topline: cijevni snop sastoji se od 1214 bakrenih cijevi unutrašnjeg promjera 20 mm i debljine stijenke 1 mm. Unutrašnji promjer plašta iznosi 1210 mm, a ukupna duljina izmjenjivača topline iznosi 5,6 m. Segmentne pregrade imaju sljedeće dimenzije: promjer 1194 mm, visina odsjeka segmentne pregrade 260 mm. Razmak između pregrada iznosi 900 mm.

U radu je potrebno dati:

1. Teorijske osnove transporta topline u plaštu izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama.
2. Opis pristupa različitih autora te navesti eventualna ograničenja i specifičnosti u primjeni njihovih jednadžbi.
3. Odabir toplinskih svojstava fluida. Provesti proračun prijelaza topline u cijevima cijevnog snopa, te provedeni proračun povezati s proračunom prijelaza topline u plaštu izmjenjivača.
4. Usporedni prikaz rezultata dobivenih u analizi prijelaza topline u plaštu.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:
1. rok: 18. veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

T. Boras

prof.dr.sc. Ivanka Boras dipl. ing.

Predsjednik Povjerenstva:

V Soldo

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. PRIJELAZ TOPLINE U PLAŠTU IZMJENJIVAČA SA SEGMENTNIM PREGRADAMA	3
2.1. Metoda prema Donohue	4
2.2. Metoda prema Gnielinskom	8
2.3. Metoda prema Slipčeviću	13
2.4. Metoda prema Bell-Delaware	16
3. PRIJELAZ TOPLINE U CIJEVIMA CIJEVNOG SNOPA	27
4. PRORAČUN PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU IZMJENJIVAČA	30
4.1. Proračun prema Donohue	32
4.2. Proračun prema Gnielinskom	34
4.3. Proračun prema Slipčeviću	40
4.4. Proračun prema Bell-Delaware	51
4.5. Analiza rezultata	52
5. PRORAČUN PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVIMA CIJEVNOG SNOPA	54
6. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE U IZMJENJIVAČU TOPLINE	56
7. ZAKLJUČAK	58
LITERATURA	59

POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama u plaštu aparata	3
Slika 2. Shematski prikaz strujanja u aparatu sa segmentnim pregradama	4
Slika 3. Definicija najužeg presjeka strujanja kod aparata s cijevima u plaštu	7
Slika 4. Faktor f_p kao funkcija t_p i t_u	11
Slika 5. Faktor f_s kao funkcija t_u	11
Slika 6. Razne izvedbe poprečno nastrujanog snopa cijevi	12
Slika 7. Putanje strujanja unutar plašta izmjenjivača topline s pregradama	16
Slika 8. Utjecaj malog i velikog odsječka pregrade	18
Slika 9. Presjek plašta sa segmentnom pregradom i oznakama	19
Slika 10. Propuštanje fluida između segmentne pregrade i plašta	21
Slika 11. Propuštanje fluida između segmentne pregrade i cijevi	21
Slika 12. Prikaz struja C i F koje su karakteristične za J_b	21
Slika 13. Tipovi rasporeda cijevi	23
Slika 14. Razmak između segmentnih pregrada u izmjenjivaču topline	24
Slika 15. Formiranje laminarnog profila brzina u cijevi	27
Slika 16. Formiranje turbulentnog profila brzina u cijevi	28
Slika 17. Prikaz konstrukcije segmentne pregrade	31
Slika 18. Prikaz koeficijenta prijelaza topline po metodama	53

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz svih korekcijskih faktora i njihovih vrijednosti	25
Tablica 2. Vrijednosti konstanti a_1, a_2, a_3, a_4	26

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_K	m^2	površina za izmjenu topline u krajnjoj zoni
A_M	m^2	površina za izmjenu topline u međuzoni
A_U	m^2	površina za izmjenu topline u uzdužnoj zoni
B_C	-	odsječak segmentne pregrade izražen u %
C_B	-	konstanta koja ovisi o tipu strujanja
c_p	J/(kg K)	specifični toplinski kapacitet
d_B	m	promjer otvora u segmentnim pregradama
D_C	m	promjer kruga koji tangira cijevi najudaljenije od centra
D_{ctl}	m	promjer koji prolazi kroz središte rubnih cijevi
d_{hU}	m	hidrodinamički promjera s beskonačno velikim brojem cijevi
D_i	m	tetiva i-tog reda cijevi
D_s	m	promjer segmentne pregrade
D_{SB}	m	promjer praznine između plašta i segmentne pregrade
D_u	m	unutarnji promjer plašta
d_v	m	vanjski promjer cijevi izmjenjivača
e	m	razmak između pojedinih cijevi
e_1	m	razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi
f_A	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir odstupanje između idealnog i realnog aparata
f_B	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja
F_c	-	udio od ukupnog broja cijevi u poprečnom presjeku
f_L	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja
f_p	-	faktor za paralelni raspored cijevi unutar plašta aparata
f_Q	-	faktor koji uzima u obzir smjer izmjene topline
f_S	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja
f_s	-	faktor koji uzima u obzir raspored cijevi unutar plašta aparata
$f_{\text{š}}$	-	faktor za šahovski raspored cijevi unutar plašta aparata

F_w	-	udio poprečnog presjeka između odsječka segmentne pregrade i unutarnjeg promjera plašta
H	m	visina odsječka segmentne pregrade
J_b	-	korekcijski faktor obilaznog strujanja oko snopa cijevi
J_c	-	korekcijski faktor koji uzima u obzir visinu odsječka segmentne pregrade i razmak između segmentnih pregrada
J_l	-	korekcijski faktor za efekt propuštanja pregrade
J_r	-	korekcijski faktor za laminarno strujanje
J_s	-	korekcijski faktor za nejednoliki razmak između pregrada
L	m	prestrujna dužina cijevi
L_K	m	razmak između pregrada u krajnjoj zoni
L_{K_i}	m	razmak između pregrada na izlazu
L_{K_u}	m	razmak između pregrada na ulazu
L_M	m	razmak između segmentnih pregrada u međuzoni
M	kg/kmol	molarna masa
N	-	ukupan broj cijevi
N_b	-	broj segmentnih pregrada
N_c	-	ukupan broj poprečno nastrujanih redova cijevi u cijelom izmjenjivaču
N_K	-	ukupan broj cijevi u krajnjoj zoni
N_M	-	ukupan broj cijevi u međuzoni
N_{tcc}	-	broj poprečno nastrujanih redova cijevi u jednom odjeljku pregrade
N_{tcw}	-	broj poprečno nastrujanih redova cijevi u jednom otvoru pregrade
N_U	-	ukupan broj cijevi u uzdužnoj zoni
Nu_D	-	Nusseltov broj prema Donohue
Nu_G	-	Nusseltov broj prema Gnielinskom
Nu_l	-	Nusseltov broj za laminarno strujanje
Nu_{SG}	-	Nusseltov broj kod idealnog poprečno nastrujanog aparata
Nu_t	-	Nusseltov broj za turbulentno strujanje

Pr	-	Prandtlov broj
Pr_{sr}	-	Prandtlov broj za srednju temperaturu medija
Pr_{st}	-	Prandtlov broj za temperaturu stijenke
q_m	kg/s	maseni protok
q_n	kmol/s	protočna količina
q_v	m ³ /s	volumenski protok
R_B	m ² /m ²	omjer slobodnog presjeka za obilazno strujanje i najužeg presjeka strujanja
R_C	m ² /m ²	omjer prstenastog presjeka i ukupnog presjeka lekažnog strujanja
Re	-	Reynoldsov broj
Re_U	-	Reynoldsov broj za uzdužnu zonu
R_L	-	omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i najužeg presjeka strujanja
r_L	m ² /m ²	omjer zbroja površina propuštanja fluida sa strane plašta i cijevi i površine poprečnog presjeka strujanja sa strane plašta
r_s	m ² /m ²	omjer površine propuštanja fluida sa strane plašta i zbroja površina propuštanja fluida sa strane plašta i cijevi
r_{ss}	-	parametar brtvene trake
S	m ²	presjek na koji se odnosi brzina strujanja
S_B	m ²	slobodni presjek za obilazno strujanje
S_b	m ²	površina zaobilaznog strujanja
s_d	m	dijagonalni korak cijevi
S_i	m ²	slobodni presjek i-tog poprečno nastrujanog reda cijevi
S_K	m ²	matematički izvedeni neegzistentni presjek za krajnju zonu
S_L	m ²	ukupni presjek za lekažno strujanje
$S_{L,C}$	m ²	prstenasti presjek za lekažno strujanje između cijevi i otvora
$S_{L,PS}$	m ²	presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade
S_M	m ²	matematički izvedeni neegzistentni presjek za međuzonu
S_m	m ²	najuži presjek strujanja u međuzoni
S_0	m ²	slobodni presjek plašta

S_p	m^2	površina poprečnog presjeka strujanja na strani plašta u središnjem pregradnom prostoru u središtu cijevnog snopa
s_p	m	poprečni korak cijevi
S_{sb}	m^2	površina propuštanja fluida sa strane plašta
S_{tb}	m^2	površina propuštanja fluida sa strane cijevi
S_u	m^2	slobodni presjek za uzdužno strujanje u segmentnom odsječku
s_u	m	uzdužni korak cijevi
t_d	m/m	normirani dijagonalni korak cijevi
t_p	m/m	normirani poprečni korak cijevi
t_u	m/m	normirani uzdužni korak cijevi
w	m/s	brzina strujanja radnog medija
w_0	m/s	brzina strujanja u slobodnom presjeku pred snopom cijevi
z_B	-	broj brtvenih traka
z_K	-	broj poprečno nastrujanih redova cijevi u krajnjoj zoni
α_B	W/(m^2 K)	koeficijent prijelaza topline prema Bell-Delaware
α_D	W/(m^2 K)	koeficijent prijelaza topline prema Donohue
α_G	W/(m^2 K)	koeficijent prijelaza topline prema Gnielinskom
α_{idB}	W/(m^2 K)	koeficijent prijelaza topline idealno poprečno nastrujanog snopa cijevi po Bellu
α_{idS}	W/(m^2 K)	srednji koeficijent prijelaza topline idealnog aparata po Sliščeviću
α_S	W/(m^2 K)	koeficijent prijelaza topline prema Slipčeviću
γ	°	središnji kut segmentne pregrade
γ_{ctl}	°	središnji kut segmentne pregrade koji se odnosi na D_{ctl}
λ	W/(m K)	toplinska provodnost
μ	kg/(m s)	koeficijent dinamičke žilavosti
ρ	kg/m ³	gustoća radnog medija
ν	m ² /s	koeficijent kinematičke žilavosti

SAŽETAK

U okviru završnog rada prikazana je analiza prijelaza topline u plaštu izmjenjivača topline tipa shell&tube sa segmentnim pregradama. Prvo je teorijski obrađen tijek proračuna s pripadajućim formulama po metodi prema Donohue, zatim po Gnielinskom, Slipčeviću i na kraju po metodi prema Bell-Delaware. Za definiranu geometriju izmjenjivača topline i zadane ulazne parametre struja, proračun je proveden prema četiri navedene metode, te su zatim dobiveni rezultati koeficijenata prijelaza topline međusobno uspoređeni. Teorijski je obrađen i prijelaz topline u cijevima cijevnog snopa te proveden odgovarajući proračun.

Ključne riječi: shell&tube, koeficijent prijelaza topline, metoda prema Donohue, metoda prema Gnielinskom, metoda prema Slipčeviću, metoda prema Bell-Delaware

SUMMARY

Within this final thesis, a heat transfer analysis in the shell of heat exchanger type shell&tube with baffles is presented. Firstly, the course of the calculation was theoretically processed with the corresponding formulas according to the method by Donohue, then according to Gnielinski, Slipčević and finally according to the method by Bell-Delaware. For the defined geometry of the heat exchanger and the given input parameters of the current, the calculation was performed according to the four mentioned methods, and then the obtained results of the heat transfer coefficients were compared with each other. Theoretically, the heat transfer in tubes of the tube bundle was also processed, and a calculation was performed for certain thermal properties of the fluids.

Keywords: shell&tube, heat transfer coefficient, method by Donohue, method by Gnielinski, method by Slipčević, method by Bell-Delaware

1.UVOD

Izmjenjivači topline su aparati koji služe za hlađenje ili zagrijavanje dva ili više fluida koji mogu biti u direktnom dodiru ili mogu biti odvojeni nepropusnom stijenkom. Prema tom kriteriju izmjenjivači topline se mogu podijeliti u tri skupine [1]:

- rekuperativni izmjenjivači topline ili rekuperatori su aparati kod kojih su fluidi međusobno odvojeni čvrstom i za tvari nepropusnom stijenkom. [2] Ovisno o konstrukcijskim zahtjevima rekuperatori mogu biti različitih izvedbi, dok su razdjelne stijenske najčešće cijevnog ili pločastog oblika. Razdjelna stijenka predstavlja ogrjevnu ili rashladnu površinu kroz koju se izmjenjuje toplinski tok. Rekuperatori se mogu podijeliti prema smjeru međusobnog strujanja fluida na: istosmjerne rekuperatore (aparati kod kojih su struje međusobno paralelne i teku u istom smjeru); protusmjerne rekuperatore (aparati kod kojih su struje međusobno paralelne, ali teku u suprotnim smjerovima), te križne rekuperatore (aparati kod kojih se struje međusobno križaju). U praksi se najčešće upotrebljavaju kombinirani rekuperatori koji se sastoje od elemenata svih triju osnovnih tipova rekuperatora;
- regenerativni izmjenjivači topline ili regeneratori su aparati koji se sastoje od pokretne (rotirajuće) ili mirujuće akumulacijske mase, te od toplijeg i hladnijeg fluida. Kod regeneratora s rotirajućom masom, s jedne strane rotirajuće akumulacijske mase struji topliji fluid koji predaje toplinu akumulacijskoj masi, pri čemu se on hladi, dok s druge strane hladniji fluid nastrojava preko tako zagrijane akumulacijske mase, te se na taj način zagrijava. Kod regeneratora s mirujućom akumulacijskom masom, toplija i hladnija struja naizmjenično se puštaju kroz nju [1];
- izmjenjivači topline s izravnim dodirnom struja su konstrukcijski najjednostavniji aparati kod kojih dolazi do izravnog miješanja struja u mješalištu.

Unutar izmjenjivača topline, toplina se prenosi na tri osnovna načina:

- Provođenje topline ili kondukcija: način je izmjene topline koji vrijedi za čvrsta tijela (krutine), ali se može pojaviti i kod tekućina koje se nalaze u jako malom prostoru da ne može doći do gibanja između njihovih čestica. Prilikom laminarnog strujanja, toplina se također prenosi provođenjem poprečno na smjer strujanja, s molekule na molekulu.

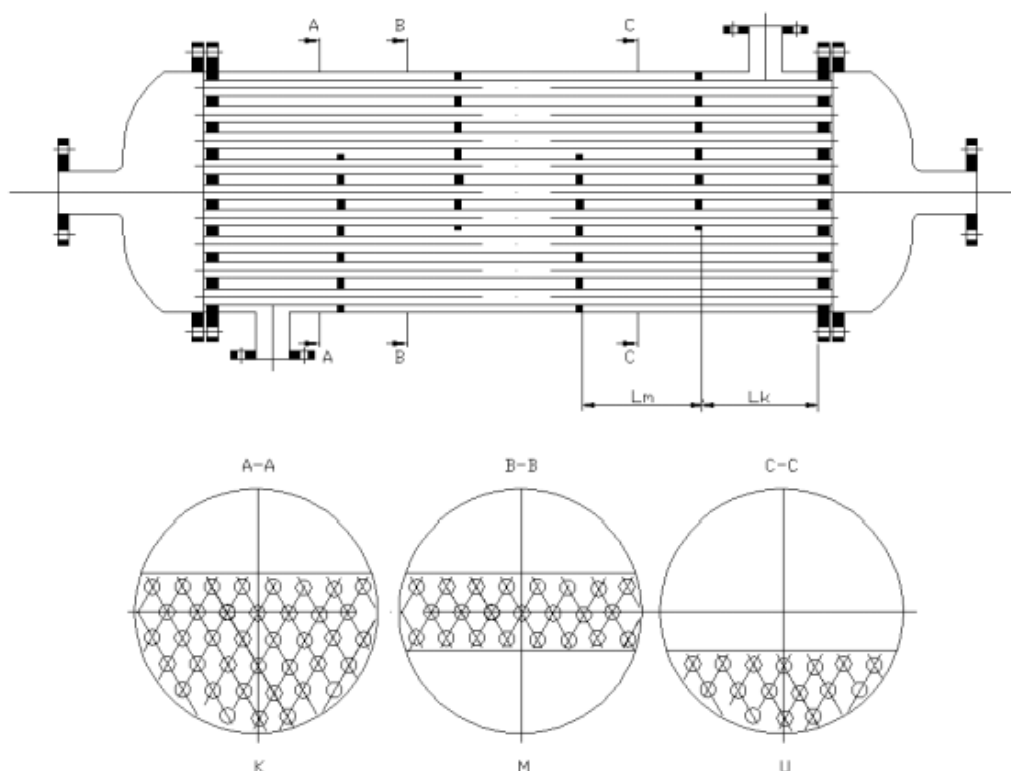
Toplina se provođenjem izmjenjuje na molekularnoj razini. Molekule više temperature imaju veću brzinu gibanja, a time i kinetičku energiju, dok molekule niže temperature imaju manju brzinu gibanja i kinetičku energiju. Toplije molekule se u sudaru s hladnijima usporavaju predajući im dio energije, dok se pri tome sporije, hladnije molekule ubrzavaju. Na taj način se prosječne brzine molekula i temperature u svim dijelovima nastoje izjednačiti [2];

- Konvekcija: prijenos topline koji se osim intermolekularnog, odvija i dodatno komešanjem čestica tekućine različite temperature. Konvektivni prijenos topline je vezan uz pojave strujanja tekućina budući da različito temperirane čestice tekućine prilikom gibanja dolaze u međusobni dodir pri kojem izmjenjuju određeni kvantum energije. Zbog gibanja čestica, konvekcija je intenzivniji način izmjene topline od provođenja. Prema uzroku gibanja tekućine razlikujemo dva oblika konvekcije: prisilnu ili prinudnu i slobodnu ili prirodnu. O prisilnoj konvekciji govorimo ako strujanje fluida nije vezano s temperaturnom razlikom, nego je umjetno potaknuto, nametnutom razlikom tlakova. Ako je gibanje čestica izazvano razlikom u gustoći pojedinih čestica tekućine, a koja je također posljedica njihovih različitih temperatura, riječ je o prirodnoj konvekciji;
- Zračenje: razlikuje se od provođenja i konvekcije po tome što za njegovo širenje nije potrebna materija kao posrednik, nego se može odvijati u vakuumu. Svako tijelo koje ima temperaturu veću od apsolutne nule emitira elektromagnetske valove. Izmijenjena energija zračenjem može prolaziti kroz područja niže ili više temperature, nego što su temperature tijela između kojih se toplina izmjenjuje, dok izmjena topline kod provođenja i konvekcije se odvija u smjeru monotonog temperaturnog pada.

U većini aparata u tehničkoj praksi su prisutna sva tri načina izmjene topline. [1]

2. PRIJELAZ TOPLINE U PLAŠTU IZMJENJIVAČA SA SEGMENTNIM PREGRADAMA

Izmjenjivači topline tipa shell and tube su aparati koji se sastoje od snopa cijevi smještenih u plašt (bubanj), te se mogu graditi s pregradama i bez njih. Kod izmjenjivača bez pregrada radni medij struji paralelno s osi cijevi, dok kod izmjenjivača s pregradama, dolazi do naizmjeničnog poprečnog i uzdužnog strujanja s obzirom na os cijevi. Kroz cijevi struji rashladni ili ogrjevni medij koji se prolaskom kroz aparat zagrijava ili hladi, dok se u prostoru oko cijevi nalazi drugi medij koji prolaskom kroz aparat također mijenja svoju temperaturu, npr. ako se medij u cijevima zagrijava onda se medij oko cijevi hladi i obratno. [Slika 1.] shematski prikazuje izmjenjivač topline sa segmentnim pregradama, koje se ugrađuju kako bi se povećala brzina strujanja medija, te poboljšao koeficijent prijelaza topline. [3]

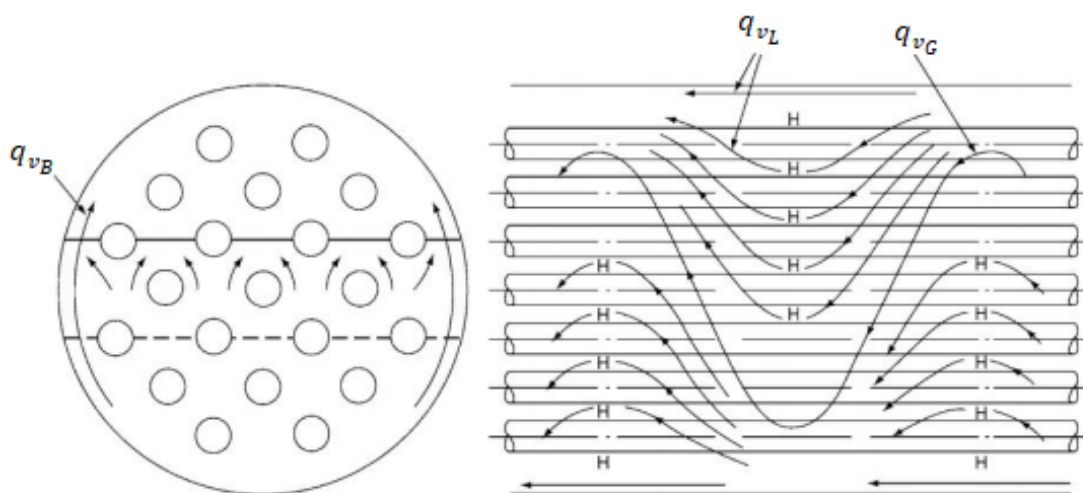


Slika 1. Shematski prikaz izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama u plaštu aparata [4]

Kao što vidimo, prikazana su tri karakteristična presjeka A-A, B-B i C-C, koji predstavljaju tri različite zone strujanja. Presjek A-A predstavlja ulaznu ili izlaznu zonu, tzv. krajnju zonu „K“, u kojoj su sve cijevi aparata poprečno nastrojane. Presjek B-B predstavlja međuzonu „M“, te su i u njoj sve cijevi poprečno nastrojane. U presjeku C-C su sve cijevi aparata uzdužno nastrojane, te se zato naziva uzdužnom zonom „U“. Iz [Slika 1] se vidi da je u krajnjoj zoni i međuzoni različit broj poprečno nastrojanih cijevi, te je različit i razmak između pregrada u tim zonama. U nastavku su opisane metode proračuna prijelaza topline u plaštu izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama prema više autora, te zatim međusobno uspoređene za zadani tip aparata. [3]

2.1. Metoda prema Donohue

Prijelaz topline u plaštu izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama je prvi sistematski istraživao Donohue. Donohue u svom proračunu nije uzeo u obzir razliku broja poprečno nastrojanih cijevi u krajnjoj zoni i međuzoni, te nije uzeo u obzir niti razmak između pregrada u tim zonama. Korekcijski faktori za lekažno i obilazno strujanje u njegovom proračunu također nisu uzeti u obzir. Na [Slika 2] shematski je prikazan jedan tip aparata sa segmentnim pregradama u kojem su prikazani glavno strujanje q_{vG} , obilazno strujanje q_{vB} i lekažno strujanje q_{vL} . [3]



Slika 2. Shematski prikaz strujanja u aparatu sa segmentnim pregradama[5]

Za izračun Nusseltovog broja po Donohue preporučuje se područje primjene $4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^4$; $0,5 \leq Pr \leq 5 \cdot 10^3$. Izraz za Nusseltov broj koji ovisi o Reynoldsovom i Prandtlovom broju dan je u jednadžbama koje slijede:

$$Nu_D = C \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \cdot f_Q \quad (1)$$

$$Re = \frac{w \cdot d_v}{\nu} = \frac{w \cdot d_v \cdot \rho}{\mu} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (3)$$

gdje je:

w - brzina strujanja radnog medija [m/s]

d_v - vanjski promjer cijevi izmjenjivača [m]

ν - koeficijent kinematičke žilavosti [m²/s]

μ - koeficijent dinamičke žilavosti [kg/(m s)]

c_p - specifični toplinski kapacitet [J/(kg K)]

λ - toplinska provodnost [W/(m K)]

Konstanta C za plašt s vrlo dobrom mehaničkom obradom iznosi $C = 0,25$, dok za neobrađeni plašt iznosi $C = 0,22$. Faktor f_Q koji uzima u obzir smjer izmjene topline (grijanje ili hlađenje) dan je izrazom:

$$f_Q = \left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_{st}} \right)^{0,14} \quad (4)$$

gdje se indeksi „sr“ i „st“ odnose na srednju temperaturu medija, te na temperaturu stijenke, dok je eksponent $n = 0,14$.

Izraz (1) za Nusseltov broj vrijedi za sljedeće uvjete:

-za razmak između segmentnih pregrada u međuzoni L_M vrijedi:

$$L_M \geq 0,2 \cdot Du \quad (5)$$

-slobodni presjek za uzdužno strujanje u segmentnom odsječku S_u mora iznositi najmanje:

$$S_u = (0,15 \text{ do } 0,20) \cdot \frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} \quad (6)$$

a definiran je izrazom:

$$S_u = \frac{Du^2}{8} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot \pi}{180} - \sin\gamma \right) - N_U \cdot \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} \quad (7)$$

$$\gamma = 2 \cdot \arccos \left(1 - \frac{2H}{D_s} \right) \quad (8)$$

gdje je:

D_u - unutarnji promjer plašta [m]

γ - središnji kut segmentne pregrade [°]

N_U - broj cijevi u uzdužnoj zoni (odsječku segmentne pregrade) [-]

H - visina odsječka segmentne pregrade [m]

D_s - promjer segmentne pregrade [m]

Brzina strujanja se odnosi na presjek S :

$$w = \frac{q_v}{S} = \frac{q_m}{\rho \cdot S} = \frac{q_n \cdot M}{\rho \cdot S} \quad (9)$$

$$S = \sqrt{S_m \cdot S_u} \quad (10)$$

$$S_m = (2 \cdot e_1 + \sum e) \cdot L_M \quad (11)$$

gdje je:

q_v - volumenski protok [m³/s]

q_m - maseni protok [kg/s]

q_n - protočna količina [kmol/s]

ρ - gustoća radnog medija [kg/m³]

M - molarna masa [kg/kmol]

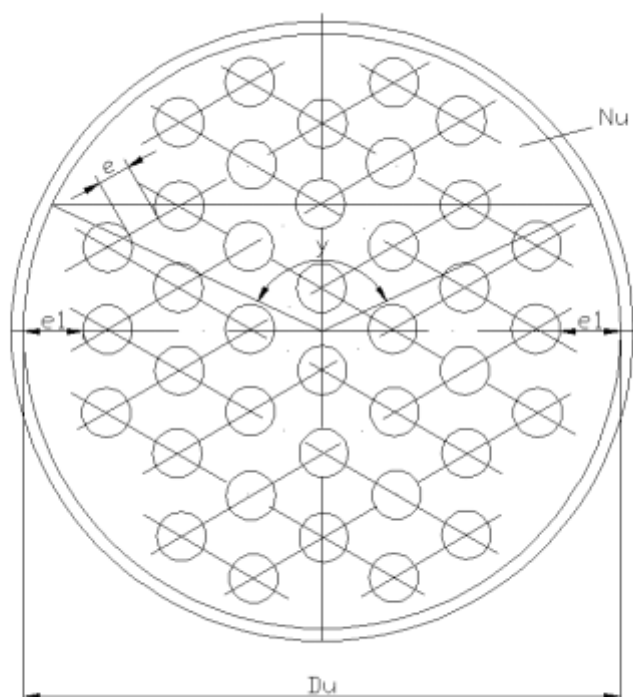
S_m - najuži presjek strujanja u međuzoni [m²]

S_u – slobodni presjek za uzdužno strujanje u segmentnom odsječku [m²]

e_1 –razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi [m]

e –razmak između pojedinih cijevi [m]

Najuži presjek strujanja koji je definiran izrazom (11), prikazan je na [Slika 3], gdje su prikazane i ostale veličine primijenjene u proračunu. [3]



Slika 3. Definicija najužeg presjeka strujanja kod aparata s cijevima u plaštu [4]

Proračun brzine strujanja u odnosu na presjek S prema izrazu (10) nije fizikalno opravdan, te se to smatra još jednim od nedostataka Donohueva proračuna.

Koeficijent prijelaza topline prema Donohue [3]:

$$\alpha_D = \lambda \cdot \frac{Nu_D}{d_v} \quad (12)$$

2.2. Metoda prema Gnielinskom

Gnielinski je uspio poboljšati i dodatno olakšati proračune svojih kolega. Njegov proračun se može smatrati najmodernijim, te osigurava točnost od $\pm 30\%$. Proračun vrijedi za područje: $10 \leq Re \leq 10^6$; $f_A \geq 0,30$ i $0,6 \leq Pr \leq 10^3$. Izraz za Nusseltov broj prema Gnielinskom glasi:

$$Nu_G = f_A \cdot Nu_{SG} \quad (13)$$

Korekcijski faktor, koji uzima u obzir odstupanje između idealnog i realnog aparata dan je izrazom:

$$f_A = f_S \cdot f_B \cdot f_L \quad (14)$$

gdje je:

f_S - korekcijski faktor koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja [–]

f_B - korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja [–]

f_L - korekcijski faktor koji uzima u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja [–]

Korekcijski faktor f_S koji uzima u obzir utjecaj uzdužnog strujanja vrijedi za područje $0,2 \leq L_M/D_u \leq 1$ i $0 \leq N_U/N \leq 0,8$, a određuje se pomoću izraza:

$$f_S = 1 - 2 \cdot \frac{N_U}{N} + 0,654 \cdot \left(\frac{N_U}{N}\right)^{0,32} \quad (15)$$

gdje je:

N - ukupan broj cijevi [–]

Korekcijski faktor uslijed obilaznog strujanja f_B određuje se prema izrazu:

$$f_B = \exp[-C_B \cdot R_B \cdot (1 - \sqrt[3]{z_B/z_K})], \text{ za } z_B < z_K \quad (16)$$

$$f_B = 1, \text{ za } z_B = z_K \quad (17)$$

$$R_B = \frac{S_B}{S_M} \quad (18)$$

$$S_B = (D_U - D_C - e) \cdot L_K \quad \text{za} \quad e < D_U - D_C \quad (19)$$

$$S_B = 0 \quad \text{za} \quad e \geq D_U - D_C \quad (20)$$

gdje je:

C_B - konstanta koja za laminarno strujanje ($Re < 100$) iznosi $C_B = 1,5$, dok za turbulentno strujanje ($Re \geq 100$) iznosi $C_B = 1,35$. [-]

R_B - omjer slobodnog presjeka za obilazno strujanje i najužeg presjeka strujanja [m^2/m^2]

S_B - slobodni presjek za obilazno strujanje [m^2]

D_C - promjer kruga koji tangira cijevi najudaljenije od centra [m]

z_B - broj brtvenih traka [-]

z_K - broj poprečno nastrujanih redova cijevi u krajnjoj zoni [-]

L_K - razmak između pregrada u krajnjoj zoni [m]

Korekcijski faktor uslijed lekažnog strujanja f_L se određuje prema izrazu:

$$f_L = 0,4 \cdot R_C + (1 - 0,4 \cdot R_C) \cdot \exp(-1,5 \cdot R_L), \text{ a vrijedi za } R_L \leq 0,80 \quad (21)$$

$$R_C = \frac{S_{L,C}}{S_L} \quad (22)$$

$$S_{L,C} = (N - N_U) \cdot \frac{(d_v^2 - d_B^2) \cdot \pi}{4} \quad (23)$$

$$S_L = S_{L,C} + S_{L,PS} \quad (24)$$

$$S_{L,PS} = \frac{(D_u^2 - D_s^2) \cdot \pi}{4} \cdot \frac{360 - \gamma}{360} \quad (25)$$

$$R_L = \frac{S_L}{S_M} \quad (26)$$

gdje je:

R_C - omjer prstenastog presjeka i ukupnog presjeka lekažnog strujanja [m^2/m^2]

R_L - omjer ukupnog presjeka za lekažno strujanje i najužeg presjeka strujanja [m^2/m^2]

$S_{L,C}$ - prstenasti presjek za lekažno strujanje između cijevi i otvora [m^2]

d_B - promjer otvora u segmentnim pregradama [m]

S_L - ukupni presjek za lekažno strujanje [m^2]

$S_{L,PS}$ - presjek za lekažno strujanje između plašta aparata i pregrade [m^2]

Na [Slika 2] shematski je prikazan tip aparata sa segmentnim pregradama u kojem su prikazani glavno, obilazno i lekažno strujanje, koje je Gnielinski u svojem proračunu uzeo u obzir s gore navedenim korekcijskim faktorima. [3]

Za Nusseltov broj Nu_{SG} kod idealnog poprečno nastrujanog aparata vrijedi izraz:

$$Nu_{SG} = f_s \cdot Nu, \text{ za } z_p \geq 10 \quad (27)$$

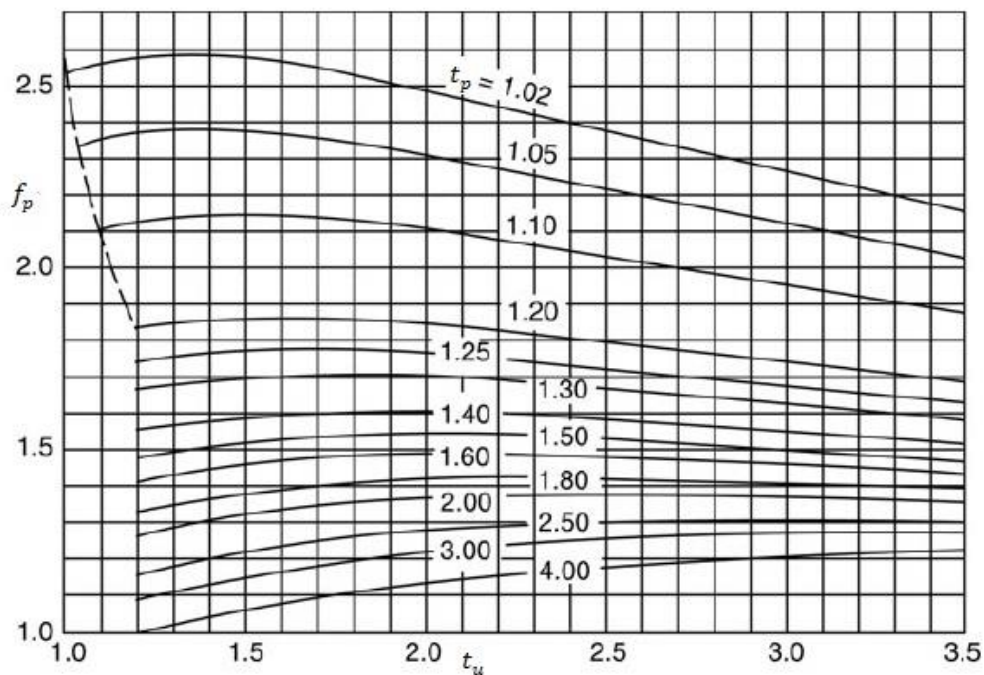
$$Nu_{SG} = \frac{1+(z_p-1)}{z_p} \cdot f_s \cdot Nu, \text{ za } z_p < 10 \quad (28)$$

Faktor f_s uzima u obzir raspored cijevi unutar plašta aparata, te se razlikuje za paralelni i šahovski raspored cijevi [3]:

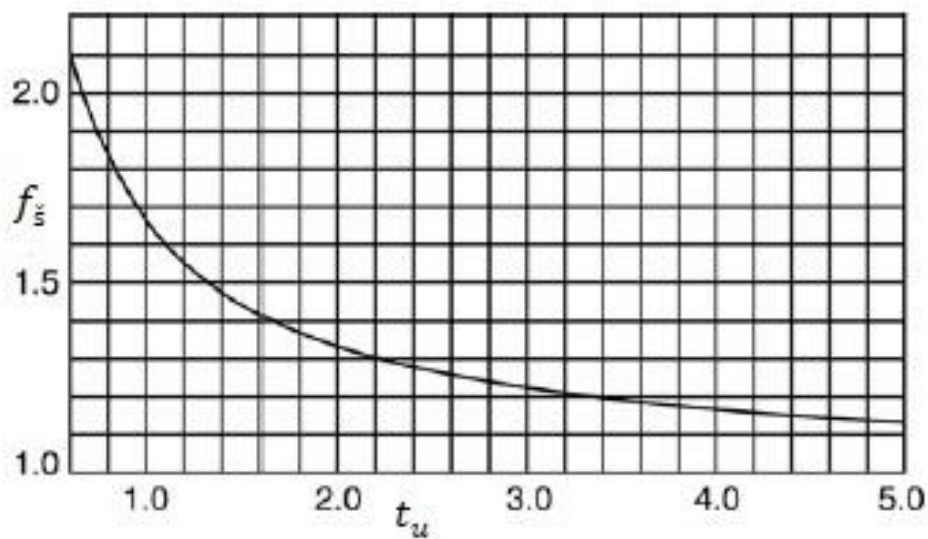
$$f_s = f_p = 1 + \frac{0,70}{\psi^{1,5}} \cdot \frac{\frac{t_u}{t_p} - 0,3}{\left(\frac{t_u}{t_p} + 0,7\right)^2} \quad (29)$$

$$f_s = f_{\text{š}} = 1 + \frac{2}{3 \cdot t_u} \quad (30)$$

Vrijednosti faktora f_p i $f_{\text{š}}$ mogu se očitati i s dijagrama prikazanih na [Slika 4] i [Slika 5]:



Slika 4. Faktor f_p kao funkcija t_p i t_u [5]



Slika 5. Faktor f_s kao funkcija t_u [5]

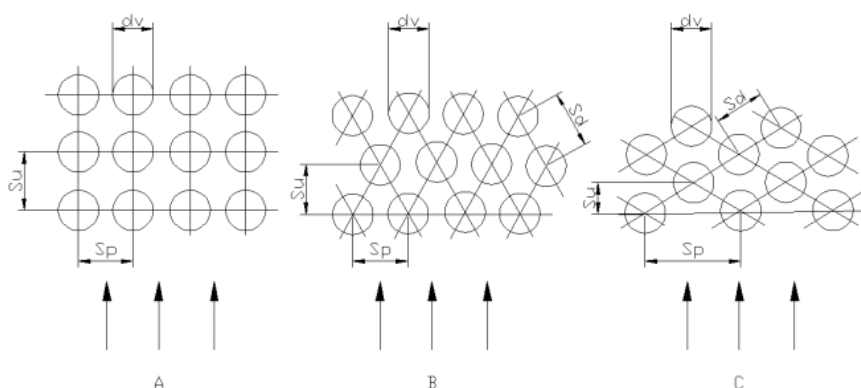
[Slika 6] prikazuje tri izvedbe rasporeda cijevi. „A“ izvedba ima paralelni raspored cijevi, dok izvedbe „B“ i „C“ imaju šahovski raspored cijevi. Na slici su označeni i koraci među cijevima sa „s“, dok indeksi „p“, „u“ i „d“ se odnose na poprečni, uzdužni i dijagonalni korak.

Izrazi za normirane korake cijevi:

$$\text{–normirani poprečni korak cijevi} \quad t_p = \frac{S_p}{d_v} \quad (31)$$

$$\text{–normirani uzdužni korak cijevi} \quad t_u = \frac{S_u}{d_v} \quad (32)$$

$$\text{–normirani dijagonalni korak cijevi} \quad t_d = \frac{S_d}{d_v} \quad (33)$$



Slika 6. Razne izvedbe poprečno nastrujanog snopa cijevi [4]

Nusseltov broj za poprečno nastrujane glatke cijevi vrijedi za područje $1 \leq Re \leq 10^7$ i $0,6 \leq Pr \leq 10^3$, a računa se prema izrazu:

$$Nu = [0,3 + (Nu_l^2 + Nu_t^2)^{0,5}] \cdot f_Q \quad (34)$$

$$Nu_l = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} \quad (35)$$

$$Nu_t = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + \frac{2,443}{Re^{0,1}} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (36)$$

gdje je:

Nu_l - Nusseltov broj za laminarno strujanje [–]

Nu_t - Nusseltov broj za turbulentno strujanje [–]

Gnielinski za proračun bezdimenzijskih brojeva upotrebljava prestrujnu dužinu L kao karakterističnu geometrijsku veličinu, te za Reynoldsov broj vrijedi izraz:

$$Re = \frac{w_0 \cdot L}{\psi \cdot \nu} \quad (37)$$

$$w = \frac{q_m}{\rho \cdot S_0} = \frac{q_n \cdot M}{\rho \cdot S_0} \quad (38)$$

$$S_0 = D_u \cdot L \quad (39)$$

$$L = \frac{d_v \cdot \pi}{2} \quad (40)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot t_p}, \quad \text{za } t_u \geq 1 \quad (41)$$

$$\psi = 1 - \frac{\pi}{4 \cdot t_p \cdot t_u}, \quad \text{za } t_u < 1 \quad (42)$$

gdje je:

w_0 - brzina strujanja u slobodnom presjeku pred snopom cijevi [m/s]

S_0 - slobodni presjek plašta [m²]

L - prestrujna dužina cijevi [m]

ψ - poroznost snopa cijevi [–]

Koeficijent prijelaza topline prema Gnielinskom:

$$\alpha_G = \lambda \cdot \frac{Nu_G}{L} \quad (43)$$

2.3. Metoda prema Slipčeviću

Slipčević u svom proračunu prijelaza topline u plaštu izmjenjivača topline uzima u obzir utjecaj promjenljive brzine strujanja u pojedinim redovima snopa cijevi na koeficijent prijelaza topline. U početnom slučaju, koji se smatra idealnim, strujanje medija kroz plašt aparata dijeli se u dvije glavne vrste strujanja: poprečno i uzdužno strujanje. Kod idealnog aparata ne uzimaju se u obzir vrtlozi, mrtve zone strujanja, lekažno, te obilazno strujanje. U krajnjoj zoni i međuzoni dolazi do poprečnog nastrujavanja snopa cijevi, dok u uzdužnoj zoni, u odsječku segmentnih pregrada, dolazi do uzdužnog strujanja, tj. strujanja paralelnog sa snopom cijevi.

Koeficijent prijelaza topline realnog aparata prema Slipčeviću se dobiva iz izraza:

$$\alpha_S = \alpha_{id_S} \cdot f_B \cdot f_L \quad (44)$$

Korekcijski faktori f_B i f_L koji uzimaju u obzir smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog i lekažnog strujanja se proračunavaju pomoću već navedenih jednadžbi od (16) do (26).

Srednji koeficijent prijelaza topline idealnog aparata, koji se odnosi na ukupnu vanjsku površinu cijevi iznosi:

$$\alpha_{id_S} = \frac{\alpha_K \cdot A_K + \alpha_M \cdot A_M + \alpha_U \cdot A_U}{A_K + A_M + A_U} \quad (45)$$

Indeksi „K“, „M“ i „U“ uz koeficijent prijelaza topline α , te uz površinu za izmjenu topline A , odnose se na krajnju, međuzonu i uzdužnu zonu. Prilikom proračuna koeficijenta prijelaza topline u krajnjoj zoni i međuzoni preporučuje se sa $N_1, N_2 \dots N_i$ označiti broj cijevi u prvom, drugom, te u i -tom redu čiji slobodni presjeci za strujanje iznose $S_1, S_2 \dots S_i$. Za srednji koeficijent prijelaza topline u krajnjoj zoni, međuzoni i uzdužnoj zoni vrijedi izraz:

$$\alpha = \lambda \cdot \frac{Nu}{d_v} \quad (46)$$

Površina za izmjenu topline u krajnjoj zoni:

$$A_K = 2 \cdot N_K \cdot d_v \cdot \pi \cdot L_K \quad (47)$$

Površina za izmjenu topline u međuzoni:

$$A_M = N_M \cdot d_v \cdot \pi(N_b - 1) \cdot L_M \quad (48)$$

Površina za izmjenu topline u uzdužnoj zoni:

$$A_U = 2 \cdot N_U \cdot d_v \cdot \pi \cdot L_K + 2 \cdot (N_b - 1) \cdot d_v \cdot \pi \cdot L_M \quad (49)$$

gdje je:

N_K - ukupan broj cijevi u krajnjoj zoni [-]

N_M - ukupan broj cijevi u međuzoni [-]

N_b - broj segmentnih pregrada [-]

Za Nusseltov broj kod snopa poprečno nastrujanih cijevi u krajnjoj i među zoni vrijedi izraz:

$$Nu = C \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \cdot f_Q \quad (50)$$

Konstanta C za paralelni raspored cijevi iznosi $C_p = 0,23$ do $0,30$, dok za šahovski raspored iznosi $C_s = 0,33$ do $0,45$. Za idealni aparat ćemo uzeti najveće vrijednosti konstanti, znači $C_p = 0,30$ i $C_s = 0,45$, dok su za realan aparat te vrijednosti uvijek manje. Reynoldsov broj se računa za vanjski promjer cijevi d_v , a svojstva medija se odnose na njegovu srednju temperaturu.

$$Re = \frac{w \cdot d_v \cdot \rho}{\mu} \quad (51)$$

$$w = \frac{q_n \cdot M}{\rho \cdot S_{K,M,U}} \quad (52)$$

$$S_{K,M} = \left(\frac{\sum N_i}{\sum \frac{N_i}{S_i^{0,6}}} \right)^{5/3} \quad (53)$$

$$S_i = (D_i - N_i \cdot d_v) \cdot L_{M,K} \quad (54)$$

$$D_i = 2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma_i \cdot \pi}{2 \cdot 180}\right) \cdot \frac{D_u}{2} \quad (55)$$

$$\gamma_i = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot H_i}{D_s}\right) \quad (56)$$

gdje je:

$S_{K,M}$ - matematički izvedeni neegzistentni presjek za krajnju zonu ili međuzonu [m^2]

S_i - slobodni presjek pojedinih poprečno nastrujanih redova cijevi [m^2]

D_i - tetiva i -tog reda cijevi [m]

$L_{M,K}$ - razmak između pregrada u međuzoni ili krajnjoj zoni [m]

Za Nusseltov broj u uzdužnoj zoni se preporučuje izraz:

$$Nu = (0,0122 + 0,00245 \cdot t_p) \cdot Re_U^{0,86} \cdot Pr^{0,4} \quad (57)$$

Izraz vrijedi za područje $10^4 \leq Re \leq 2 \cdot 10^5$; $2,3 \leq Pr \leq 18$ i $1,25 \leq t_p \leq 1,6$.

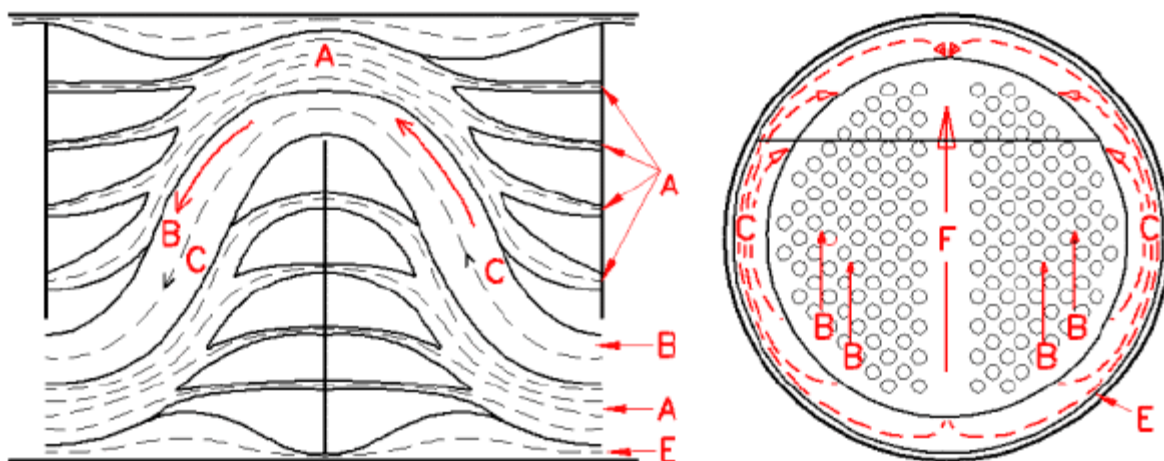
Reynoldsov broj za uzdužnu zonu je funkcija hidrodinamičkog promjera d_{hU} s beskonačno velikim brojem cijevi [3]:

$$Re_U = \frac{w_U \cdot d_{hU} \cdot \rho}{\mu} \quad (58)$$

$$d_{hU} = d_v \cdot \left[\left(2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{t_p^2}{\pi} \right) - 1 \right] \quad (59)$$

2.4. Metoda prema Bell-Delaware

Bell-Delaware metoda je najkompletnija metoda za proračunavanje prijelaza topline u plaštu izmjenjivača topline sa cijevnim snopom i segmentnim pregradama. Bellova poluanalitička metoda za proračun izmjenjivača toline shell&tube je razvijena na osnovu istraživanja koje je provodio na Sveučilištu Delaware. U njegovom proračunu su uzeti u obzir zaobilazno strujanje i propuštanje struje fluida. Razliku je se pet vrsta strujanja označenih slovima A,B,C,E i F koji su prikazani na [Slika 7]. [6]



Slika 7. Putanje strujanja unutar plašta izmjenjivača topline s pregradama [10]

Struja A predstavlja prolaz struje kroz snop cijevi između segmentne pregrade i stijenke plašta. Struja B predstavlja glavno poprečno strujanje, tj. strujanje fluida preko idealnog snopa cijevi. Struja C je zaobilazna struja cijevnog snopa u međuprostoru između snopa cijevi i stijenke plašta.

Struja E je protok koji nastaje propuštanjem između ruba segmentne pregrade i stijenke plašta. Struja F predstavlja zaobilazno strujanje u razdjelnom dijelu između dva prolaza cijevi. [7]

Koeficijent prijelaza topline kod Bell-ove metode dan je izrazom u kojem je koeficijent prijelaza topline idealnog poprečno nastrujanog snopa cijevi aparata pomnožen nizom korekcijskih faktora koji uzimaju u obzir odstupanja od idealnog aparata [7]:

$$\alpha_B = \alpha_{id_B} \cdot (J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s) \quad (60)$$

$$\alpha_{id_B} = j_i \cdot c_p \cdot \frac{q_n \cdot M}{S_p} \cdot Pr^{-2/3} \quad (61)$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda} \quad (62)$$

za kutove između cijevi od 30° i 90°:

$$S_p = L_M \cdot \left[(D_u - D_c) + (D_c - d_v) \cdot \frac{s_u - d_v}{s_u} \right] \quad (63)$$

za kutove između cijevi od 45°:

$$S_p = L_M \cdot \left[(D_u - D_c) + (D_c - d_v) \cdot \frac{s_u - d_v}{0,707 \cdot s_u} \right] \quad (64)$$

gdje je:

α_{id_B} - koeficijent prijelaza topline idealno poprečno nastrujanog snopa cijevi po Bellu
[W/(m² K)]

J_c - korekcijski faktor koji uzima u obzir visinu odsječka segmentne pregrade i razmak između segmentnih pregrada [-]

J_l - korekcijski faktor za efekt propuštanja pregrade [-]

J_b - korekcijski faktor obilaznog strujanja oko snopa cijevi [-]

J_r - korekcijski faktor za laminarno strujanje [-]

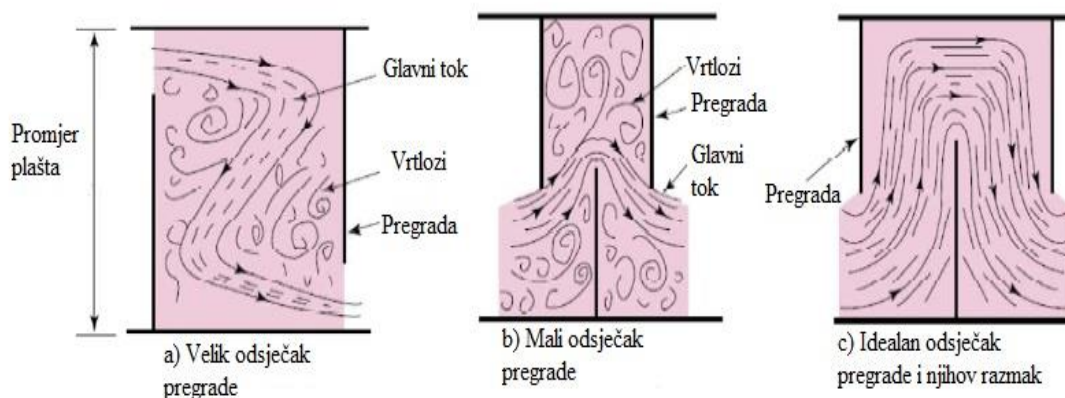
J_s - korekcijski faktor za nejednoliki razmak između pregrada [-]

j_i - Colburnov faktor [-]

S_p - površina poprečnog presjeka strujanja na strani plašta u središnjem pregrađenom prostoru u središtu cijevnog snopa [m²]

$-J_c$ je korekcijski faktor koji se uzima za visinu odsječaka segmentne pregrade i razmak između segmentnih pregrada. Uzima u obzir prijelaz topline u otvoru i služi za izračun ukupnog koeficijenta prijelaza topline za cijeli izmjenjivač. Ovisno o promjeru plašta i udaljenosti presjeka pregrade do unutarnjeg promjera plašta može iznositi:

- Za veliki odsječak segmentne pregrade njegova vrijednost se može smanjiti na vrijednost 0,53;
- Za izmjenjivače bez cijevi u otvoru jednak je 1,0;
- Za male otvore kroz koje fluid struji velikom brzinom njegova vrijednost može porasti na 1,5. [7]



Slika 8. Utjecaj malog i velikog odsječka pregrade [8]

Korekcijski faktor J_c možemo izračunati pomoću izraza [9]:

$$J_c = 0,55 + 0,72 \cdot F_c \quad (65)$$

$$F_c = 1 - 2 \cdot F_w \quad (66)$$

$$F_w = \frac{\gamma_{ctl}}{360^\circ} - \frac{\sin(\gamma_{ctl})}{2 \cdot \pi} \quad (67)$$

$$\gamma_{ctl} = 2 \cdot \cos^{-1} \left\{ \frac{D_u}{D_{ctl}} \cdot \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{B_c}{100} \right) \right] \right\} \quad (68)$$

$$D_{ctl} = D_c - d_v \quad (69)$$

$$B_c = \left(\frac{H}{D_s} \right) \cdot 100 \quad (70)$$

gdje je:

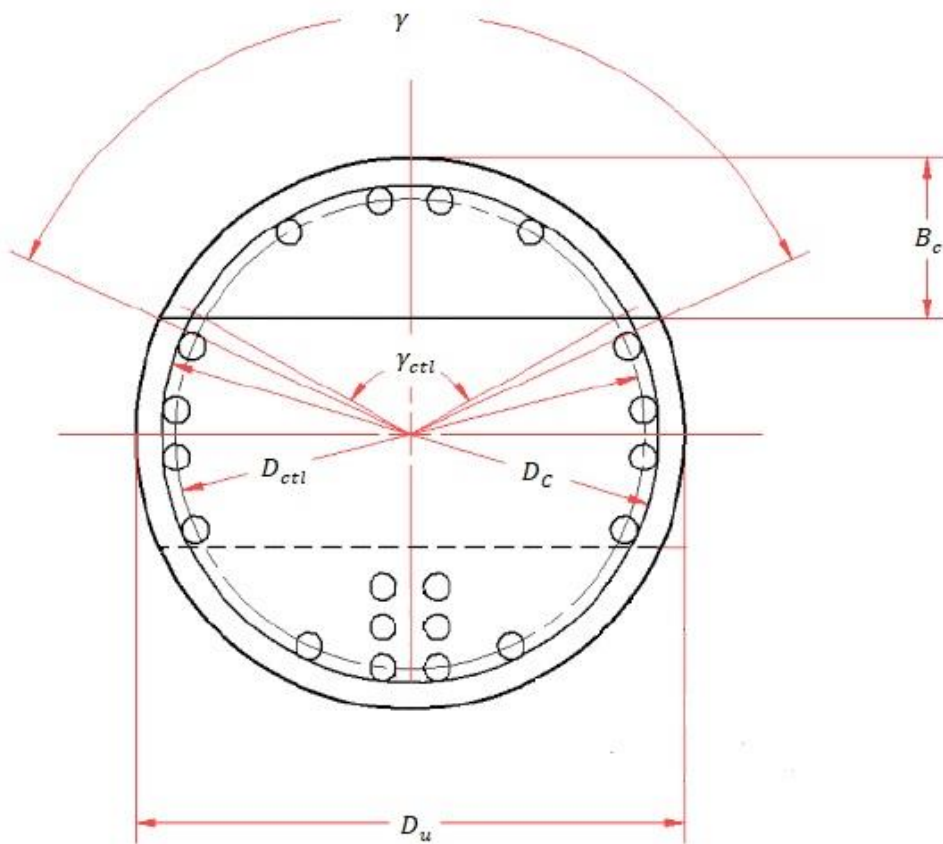
F_c - udio od ukupnog broja cijevi u poprečnom presjeku [–]

F_w - udio poprečnog presjeka između odsječka segmentne pregrade i unutarnjeg promjera plašta [–]

D_{ctl} - promjer koji prolazi kroz središte rubnih cijevi [m]

B_c - odsječak segmentne pregrade izražen u % [–]

γ_{ctl} - središnji kut segmentne pregrade koji se odnosi na D_{ctl}



Slika 9. Presjek plašta sa segmentnom pregradom i oznakama [11]

$-J_l$ je korekcijski faktor koji uzima u obzir efekt propusnosti segmentne pregrade, uključujući propusnost između cijevi i segmentne pregrade, te između plašta i segmentne pregrade. Ako su segmentne pregrade postavljene preblizu, tada se povećava propušteni dio protoka u usporedbi s poprečnim protokom.

J_l je funkcija:

-omjera ukupne površine propuštanja po segmentnoj pregradi i područja poprečnog strujanja između cijevi i segmentne pregrade

-omjera područja propuštanja između plašta i segmentne pregrade u odnosu na područje propuštanja između cijevi i segmentne pregrade.

Njegova tipična vrijednost se kreće u rasponu od 0,7 do 0,8. [7]

Korekcijski faktor J_l može se izračunati pomoću izraza [9]:

$$J_l = 0,44 \cdot (1 - r_s) + (1 - 0,44 \cdot (1 - r_s)) \cdot \exp(-2,2 \cdot r_L) \quad (71)$$

$$r_s = \frac{S_{sb}}{S_{sb} + S_{tb}} \quad (72)$$

$$r_L = \frac{S_{sb} + S_{tb}}{S_p} \quad (73)$$

$$S_{sb} = D_u \cdot D_{SB} \cdot (\pi - 0,5 \cdot \gamma) \quad (74)$$

$$S_{tb} = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_v + H)^2 - d_v^2] \cdot N \cdot (1 - F_w) \quad (75)$$

gdje je:

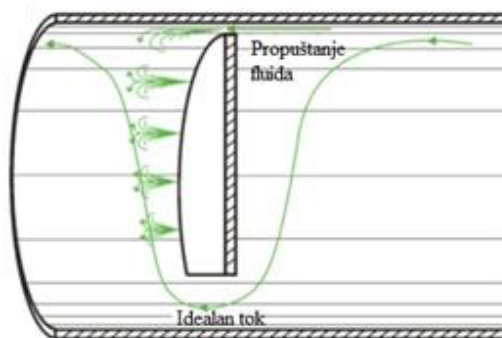
r_s - omjer površine propuštanja fluida sa strane plašta i zbroja površina propuštanja fluida sa strane plašta i cijevi [m^2/m^2]

r_L - omjer zbroja površina propuštanja fluida sa strane plašta i cijevi i površine poprečnog presjeka strujanja sa strane plašta [m^2/m^2]

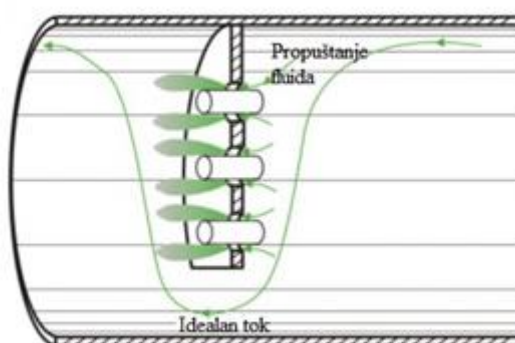
S_{sb} - površina propuštanja fluida sa strane plašta [m^2]

S_{tb} - površina propuštanja fluida sa strane cijevi [m^2]

D_{SB} - promjer praznine između plašta i segmentne pregrade [m]

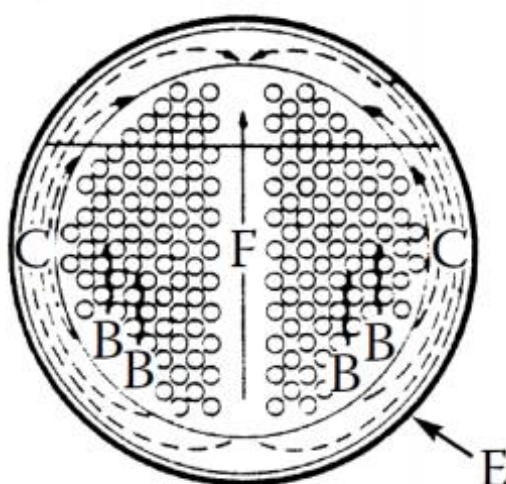


Slika 10. Propuštanje fluida između segmentne pregrade i plašta [10]



Slika 11. Propuštanje fluida između segmentne pregrade i cijevi [10]

$-J_b$ je korekcijski faktor koji uzima u obzir efekt zaobilaženja snopa zbog razmaka između rubnih cijevi i plašta i dijela između dva prolaza cijevi. Ovaj faktor uzima u obzir utjecaj C i F struja koje su prikazane na [Slika 12]. [7]



Slika 12. Prikaz struja C i F koje su karakteristične za J_b [7]

- Za relativno mali razmak između rubnih cijevi cijevnog snopa i plašta, korekcijski faktor iznosi $J_b = 0,90$

- Za velike razmake između rubnih cijevi cijevnog snopa i plašta iznosi $J_b = 0,70$.

Brtvene trake mogu povećati vrijednost J_b . [7]

Korekcijski faktor J_b možemo izračunati pomoću izraza [11]:

$$J_b = \exp \left[-C_j \cdot \frac{S_b}{S_m} \cdot \left(1 - \sqrt[3]{2 \cdot r_{ss}} \right) \right] \quad \text{za } r_{ss} < 0,5 \quad (76)$$

$$J_b = 1 \quad \text{za } r_{ss} \geq 0,5 \quad (77)$$

Konstanta C_j za vrijednosti Reynolsovog broja ($Re \leq 100$) iznosi $C_j = 1,35$, dok za ($Re > 100$) iznosi $C_j = 1,25$.

$$S_b = L_M \cdot \left(D_u - D_c - \frac{d_v}{2} \right) \quad (78)$$

$$r_{ss} = \frac{z_B}{N_{tcc}} \quad (79)$$

$$N_{tcc} = \frac{D_u}{s} \cdot \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{B_c}{100} \right) \right] \quad (80)$$

$$s = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot s_u \quad \text{za } 30^\circ \quad (81)$$

$$s = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot s_d \quad \text{za } 45^\circ \quad (82)$$

$$s = s_p \quad \text{za } 90^\circ \quad (83)$$

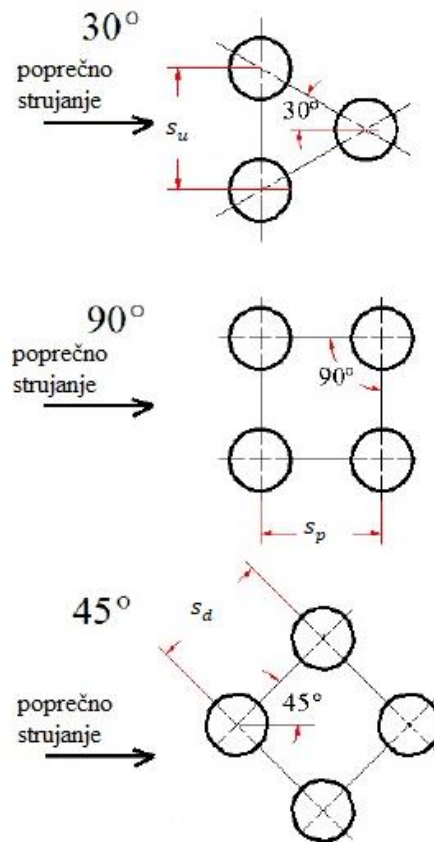
gdje je:

S_b -površina zaobilaznog strujanja [m^2]

r_{ss} -parametar brtvene trake [-]

N_{tcc} - broj poprečno nastrujanih redova cijevi u jednom pregrade [-]

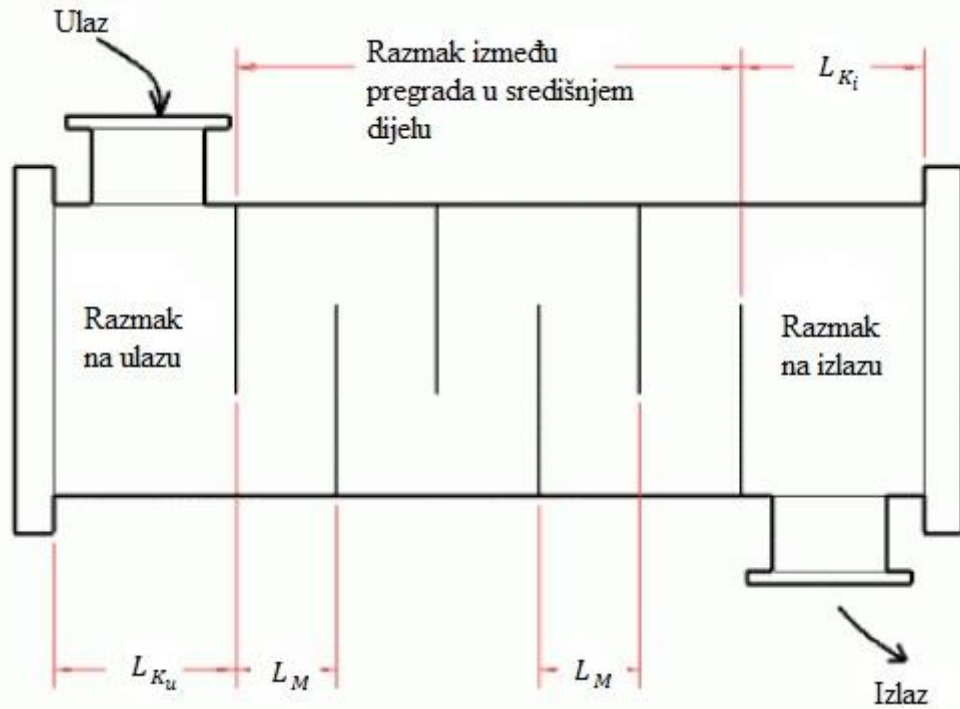
Na [Slika 13] su prikazani tipovi rasporeda cijevi u ovisnosti o kutu:



Slika 13. Tipovi rasporeda cijevi [11]

$-J_s$ je korekcijski faktor nejednolikog razmaka između segmentnih pregrada koji objašnjava štetni učinak nejednolikog razmaka ulazne i/ili izlazne pregrade u odnosu na središnji razmak pregrada. Zbog nejednolikog razmaka ulazne i/ili izlazne mlaznice dolazi do smanjenja brzine u tim dijelovima, koja ima nepovoljan utjecaj na prijelaz topline. Za nejednolik razmak pregrada na ulazu i izlazu u odnosu na središnji dio korekcijski faktor iznosi $J_s < 1$, dok za jednake razmake između pregrada nije potreban korekcijski faktor, tj. on iznosi $J_s = 1$. [5] Vrijednost J_s je najčešće između vrijednosti 0,85 i 1,0 [7].

Na [Slika 14] su prikazani razmaci između ulazne i izlazne pregrade, te između središnjih pregrada:



Slika 14. Razmak između segmentnih pregrada u izmjenjivaču topline [9]

Korekcijski faktor J_s možemo izračunati pomoću izraza [9]:

$$J_s = \frac{(N_b - 1) + \left(\frac{L_{K_u}}{L_M}\right)^{1-n} + \left(\frac{L_{K_i}}{L_M}\right)^{n-1}}{(N_b - 1) + \left(\frac{L_{K_u}}{L_M}\right) + \left(\frac{L_{K_i}}{L_M}\right)} \quad (84)$$

$$N_b = 1 + \int (L - (d_v - d_u) - L_{K_u} - L_{K_i}) \quad (85)$$

gdje je:

$n = 0,6$ - za turbulentno strujanje ($Re \geq 100$)

$n = 1/3$ - za laminarno strujanje ($Re < 100$)

L_{K_u} - razmak između pregrada na ulazu [m]

L_{K_i} - razmak između pregrada na izlazu [m]

J_r je korekcijski faktor za laminarno strujanje. Prijelaz topline u laminarnom strujanju smanjuje štetni utjecaj temperaturnog gradijenta formiranog u graničnom sloju koji se širi duž strujanja. J_r

se primjenjuje ako je Reynoldsov broj sa strane plašta manji od 100. Ako je $Re < 20$, ima potpuni učinak, a ako je $Re > 100$ faktor J_r je jednak 1,0.

Korekcijski faktor J_r možemo izračunati pomoću izraza [9]:

$$J_r = J_{rL} \quad \text{za} \quad Re \leq 20 \quad (86)$$

$$J_r = J_{rL} + \frac{(20-Re) \cdot (J_{rL}-1)}{80} \quad \text{za} \quad 20 < Re \leq 100 \quad (87)$$

$$J_r = 1 \quad \text{za} \quad Re > 100 \quad (88)$$

$$J_{rL} = \left(\frac{10}{N_c}\right)^{0,18} \quad (89)$$

$$N_c = (N_{tcw} + N_{tcc}) \cdot (1 + N_b) \quad (90)$$

$$N_{tcw} = \frac{0,8}{L_{pp}} \cdot \left[D_v \cdot \left(\frac{B_c}{100}\right) - \frac{D_v - (D_{otl} - d_v)}{2} \right] \quad (91)$$

gdje je:

J_{rL} - korekcijski faktor za Reynoldsov broj manji do 20 [–]

N_c - ukupan broj poprečno nastrujanih redova cijevi u cijelom izmjenjivaču [–]

N_{tcw} - broj poprečno nastrujanih redova cijevi u jednom otvoru pregrade [–]

Tablica 1. Prikaz svih korekcijskih faktora i njihovih vrijednosti [10]

korekcijski faktor	za	najčešće vrijednosti
J_c	presjek pregrade i razmak između pregrada	0,53-1,15
J_l	propusnost pregrade	0,7-0,8
J_b	zaobilazno strujanje	0,7-0,9
J_r	laminarno strujanje	0,85-1,0
J_s	nejednolik razmak između pregrada u ulaznom i izlaznom dijelu	1 za $Re > 100$
$J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s$	umnožak svih faktora	0,6

U [Tablica 1] su prikazane najčešće vrijednosti svih korekcijskih faktora, te njihov umnožak. Colburnov j_i faktor se koristi pri proračunu prijelaza topline i slobodnom i prisilnom konvekcijom, te se i naziva koeficijent prijelaza topline. Colburnov broj je funkcija Reynoldsovog broja sa strane plašta, rasporeda i koraka cijevi.

$$j_i = a_1 \cdot \left(\frac{1.33}{s_u/d_v} \right)^a \cdot Re^{a_2} \quad (92)$$

$$a = \frac{a_3}{1 + 0,14 \cdot Re^{a_4}} \quad (93)$$

$$Re = \frac{d_v \cdot q_n \cdot M_z}{\mu \cdot S_p} \quad (94)$$

Konstante a_1, a_2, a_3, a_4 ovise o kutu rasporeda cijevi i Reynoldsovom broju. Njihove vrijednosti su prikazane u [Tablica 2].

Tablica 2. Vrijednosti konstanti a_1, a_2, a_3, a_4 [11]

Layout Angle	Reynold's Number	a1	a2	a3	a4
30°	< 10	1.400	-0.667	1.450	0.519
	10 ² - 10	1.360	-0.657		
	10 ³ - 10 ²	0.593	-0.477		
	10 ⁴ - 10 ³	0.321	-0.388		
	10 ⁵ - 10 ⁴	0.321	-0.388		
45°	< 10	1.550	-0.667	1.930	0.500
	10 ² - 10	0.498	-0.656		
	10 ³ - 10 ²	0.730	-0.500		
	10 ⁴ - 10 ³	0.370	-0.396		
	10 ⁵ - 10 ⁴	0.370	-0.396		
90°	< 10	0.970	-0.667	1.187	0.370
	10 ² - 10	0.900	-0.631		
	10 ³ - 10 ²	0.408	-0.460		
	10 ⁴ - 10 ³	0.107	-0.266		
	10 ⁵ - 10 ⁴	0.370	-0.395		

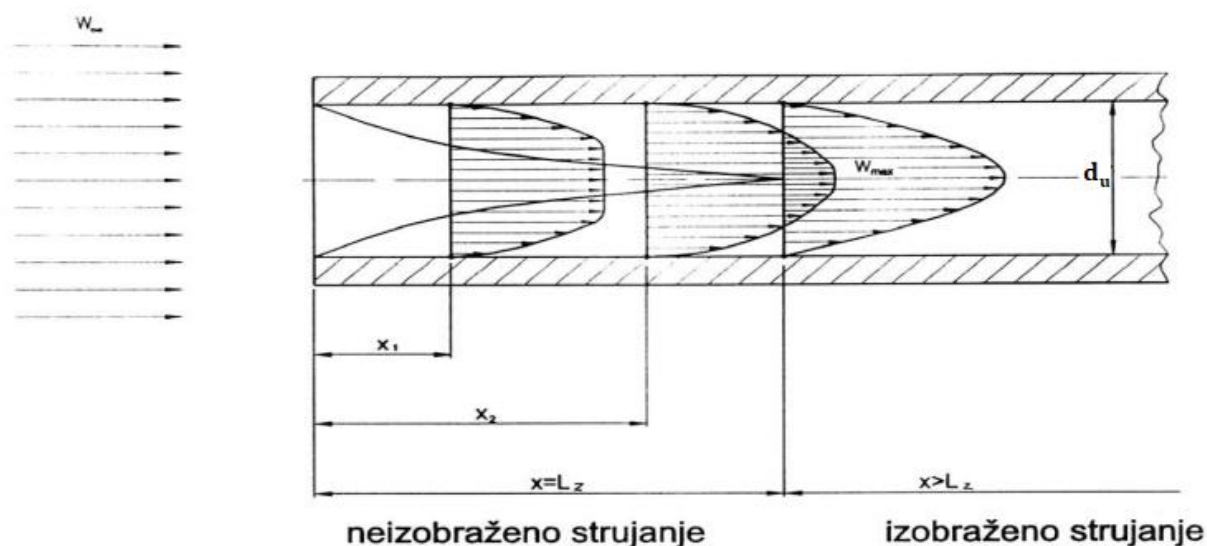
3. PRIJELAZ TOPLINE U CIJEVIMA CIJEVNOG SNOPA

Prijelaz topline u cijevima može se odvijati na dva načina s obzirom na tip strujanja:

-laminarno i

-turbulentno [1]

Laminarno strujanje je karakteristično za cijevi malih promjera kroz koje fluid, viskozna (žilava) kapljevina struji malom brzinom. Na [Slika 15] je prikazano formiranje laminarnog profila brzina u cijevi. [12]



Slika 15. Formiranje laminarnog profila brzina u cijevi [12]

Na [Slika 15] je prikazana promjena profila brzine duž unutrašnje plohe cijevi. Udaljavanjem od naletnog brida brzina svake strujnice se povećava. Područje unutar kojega se razvija profil brzina nazivamo područjem neizobraženog strujanja, a iz [Slika 15] je vidljivo da je to područje $0 < x < L_z$. Područje unutar kojega se profil brzine strujanja prestaje mjenjati $x > L_z$, nazivamo područje izobraženog strujanja. Profil brzine kod izobraženog laminarnog strujanja tekućine kroz cijev odgovara kvadratnoj paraboli, koji se kao funkcija polumjera r može zapisati u obliku $w = f(r^2)$. [12] Maksimalna brzina w_{max} tekućine postiže se u osi cijevi, dok je minimalna brzina $w_{min} = w_s = 0$ na stijenci cijevi. [1]

Laminarno strujanje kapljevine i plinova vrijedi za područje $Re < 2300$. Nusseltov broj za prijelaz topline u cijevima, pri laminarnom strujanju može se prikazati kao funkcija Reynoldsova i Prandtlova broja [3]:

$$Nu_L = 0,667 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \cdot \sqrt{\frac{d_u}{L}} \quad (95)$$

Ako jednadžbu (95) svedemo na dužinu cijevi L umjesto na unutarnji promjer cijevi d_u , dobiva se izraz:

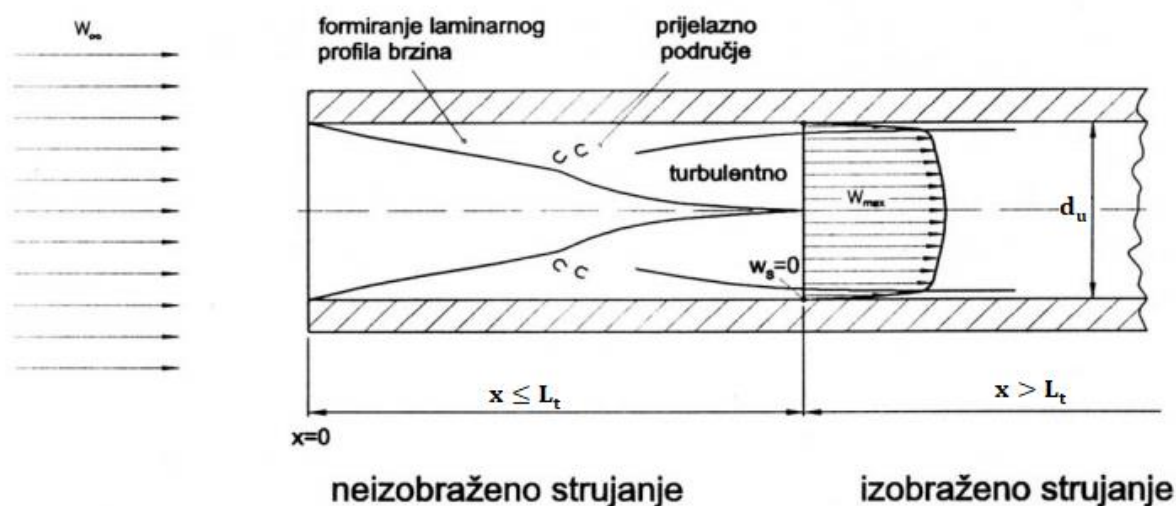
$$Nu_L = 0,667 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (96)$$

Svojstva medija određujemo za njegovu srednju temperaturu, a bezdimenzijske značajke računamo pomoću unutarnjeg promjera cijevi [3]:

$$Re = \frac{4 \cdot q_m}{d_u \cdot \pi \cdot \mu} \quad (97)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} \quad (98)$$

Turbulentno strujanje karakteristično je za fluide manje kinematičke žilavosti, koji struje velikom brzinom kroz cijevi čiji je unutarnji promjer velik. Na [Slika 16] je prikazano formiranje turbulentnog profila brzina u cijevi [12]:



Slika 16. Formiranje turbulentnog profila brzina u cijevi [12]

Iz [Slika 16] se vidi formiranje laminarnog strujanja pri ulazu u cijev, koji se nakon određene duljine cijevi formira u prijelazno područje strujanja. Laminarno i prijelazno strujanje predstavljaju neizobraženo strujanje, koje se formira na duljini cijevi $0 \leq x \leq L_t$. Nakon duljine L_t nastaje ustaljeni profil brzina tekućine, tj. postignuto je izobraženo strujanje kroz cijev. [1]

Nusseltov broj za turbulentno strujanje kroz cijev, koji vrijedi za $2300 < Re \leq 10^4$; $0,5 < Pr < 10^3$ i $d_u/L \leq 1$ [3]:

$$Nu_T = 0,0235 \cdot (Re^{4/5} - 230) \cdot \left(1,8 \cdot Pr^{3/10} - 0,8\right) \cdot f_G \cdot f_Q \quad (99)$$

$$f_G = 1 + \sqrt[3]{\left(\frac{d_u}{L}\right)^2} \quad (100)$$

$$f_Q = \left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_{st}}\right)^{0,14} \quad (101)$$

gdje je:

f_G - geometrijski faktor [-]

f_Q - korekcijski faktor za smjer izmjene topline [-]

Nusseltov broj za vrijednosti $Re > 10^4$ najčešće se određuje pomoću izraza:

$$Nu_T = C \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n \quad (102)$$

Pri čemu se bezdimenzijske značajke također određuju pomoću unutarnjeg promjera cijevi, a konstanta C i eksponent n iznose:

$$C = 0,023 ; n = 0,40 \quad \text{za} \quad 0,7 < Pr < 2500 \quad \text{i} \quad Re > 10^4$$

$$C = 0,021 ; n = 0,43 \quad \text{za} \quad 0,6 < Pr < 2500 \quad \text{i} \quad Re > 10^4.$$

Koeficijent prijelaza topline kroz cijevi se određuje pomoću izraza:

$$\alpha_u = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_u} \quad (103)$$

4. PRORAČUN PRIJELAZA TOPLINE U PLAŠTU IZMJENJIVAČA

Potrebne veličine za proračun:

- fizikalna svojstva radnog medija (zrak) za srednju temperaturu $\vartheta_{sr} = \vartheta_{ul} = 75^\circ\text{C}$ [13]:

$q_{n_z} = 1500 \text{ kmol/h}$ - protočna količina zraka

$M_z = 28,96 \text{ kmol/kg}$ - molarna masa zraka

$p_z = 5 \text{ bar}$ - tlak zraka

$\rho_z = 5,05 \text{ kg/m}^3$ - gustoća zraka

$c_{p_z} = 1017 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ - specifični toplinski kapacitet zraka

$\mu_z = 23,14 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ - koeficijent dinamičke žilavosti zraka

$\lambda_z = 0,03 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ - toplinska provodnost zraka

- geometrijske veličine:

$d_u = 0,02 \text{ m}$ - unutarnji promjer cijevi

$d_v = 0,022 \text{ m}$ - vanjski promjer cijevi

$D_u = 1,21 \text{ m}$ - unutarnji promjer plašta

$L_M = 0,9 \text{ m}$ - razmak između segmentnih pregrada u međuzoni

$L_K = 1 \text{ m}$ - razmak između pregrada u krajnjoj zoni

$D_s = 1,194 \text{ m}$ - promjer segmentne pregrade

$H = 0,26 \text{ m}$ - visina odsječka segmentne pregrade

$N = 1214$ - ukupan broj cijevi

$N_U = 228$ - ukupan broj cijevi u uzdužnoj zoni

$e_1 = 0,05255 \text{ m}$ - razmak između plašta aparata i vanjskih cijevi

$e = 0,007 \text{ m}$ - razmak između pojedinih cijevi

$D_c = 1,145 \text{ m}$ - promjer kruga koji tangira vanjske cijevi

$z_B = 0$ - broj brtvenih traka

$z_K = 29,5$ - broj poprečno nastrojanih redova u krajnjoj zoni

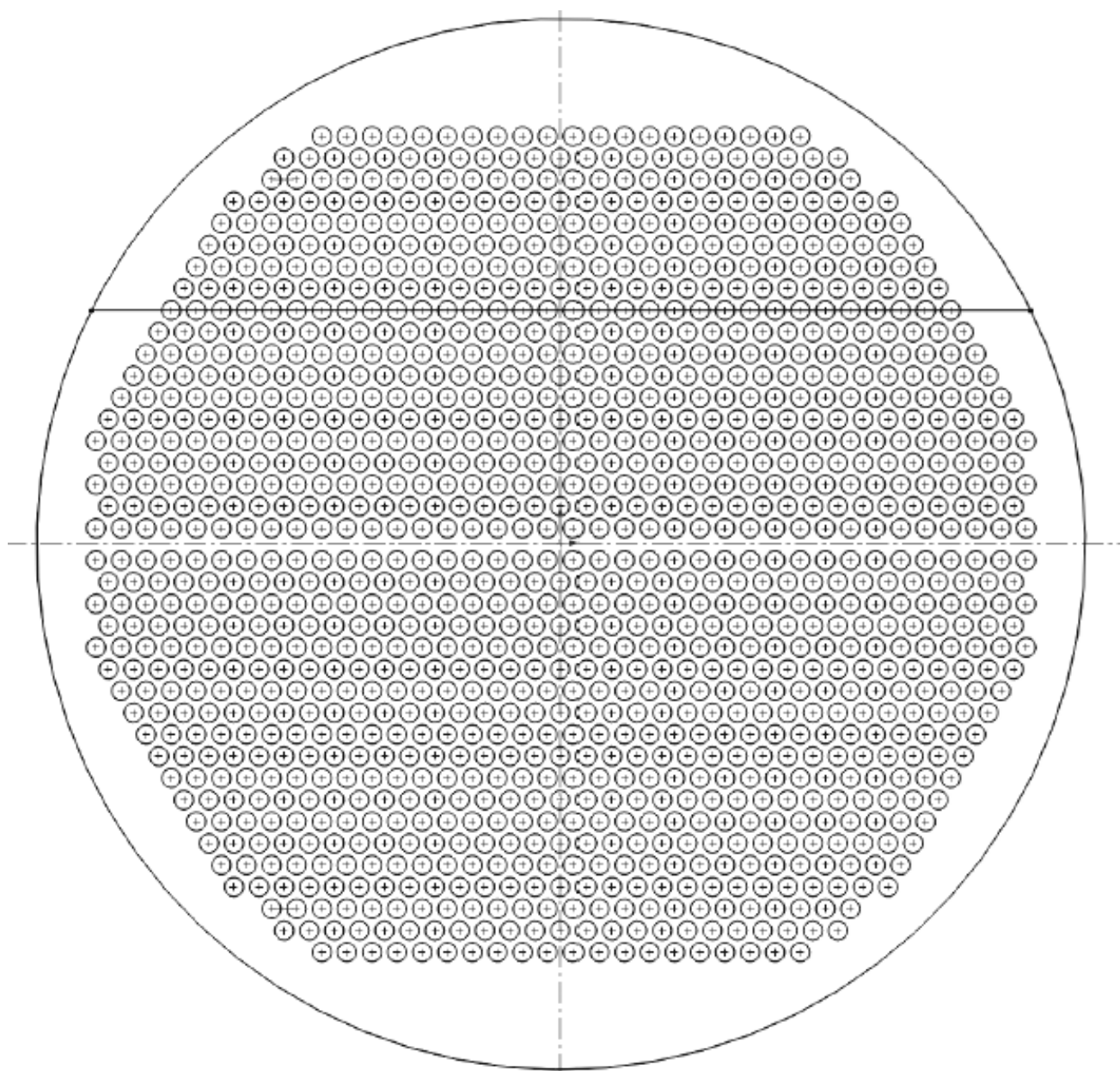
$z_p = 23$ - broj redova poprečno nastrojanih cijevi

$d_B = 0,023$ m - promjer otvora u segmentnim pregradama

$s_p = 0,029$ m - poprečni korak cijevi

$s_u = 0,025$ m - uzdužni korak cijevi

$N_b = 5$ - broj segmentnih pregrada



Slika 17. Prikaz konstrukcije segmentne pregrade

4.1. Proračun prema Donohue

Prema (5):

$$L_M \geq 0,2 \cdot Du \quad (104)$$

0,9 m > 0,2 · 1,21 = 0,242 m -Zadovoljava

Prema (8):

$$\begin{aligned} \gamma &= 2 \cdot \arccos \left(1 - \frac{2H}{D_s} \right) & (105) \\ &= 2 \cdot \arccos \left(1 - \frac{2 \cdot 0,26}{1,194} \right) \\ &= 111,266^\circ \end{aligned}$$

Slobodni presjek za uzdužno strujanje u segmentnom odsječku prema (6) mora iznositi najmanje:

$$S_u = (0,15 \text{ do } 0,20) \cdot \frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} \quad (106)$$

$$\begin{aligned} S_{u,15\%} &= 0,15 \cdot \frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} \\ &= 0,15 \cdot \frac{1,21^2 \cdot \pi}{4} \\ &= 0,17248 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{u,20\%} &= 0,20 \cdot \frac{D_u^2 \cdot \pi}{4} \\ &= 0,20 \cdot \frac{1,21^2 \cdot \pi}{4} \\ &= 0,22998 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Prema (7) stvarni slobodni presjek za uzdužno strujanje u segmentnom odsječku iznosi:

$$\begin{aligned}
 S_u &= \frac{Du^2}{8} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot \pi}{180} - \sin\gamma \right) - N_U \cdot \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} & (107) \\
 &= \frac{1,21^2}{8} \cdot \left(\frac{111,266 \cdot \pi}{180} - \sin(111,266) \right) - 228 \cdot \frac{0,022^2 \cdot \pi}{4} \\
 &= 0,09818 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Prema (11):

$$\begin{aligned}
 S_m &= \left(2 \cdot e_1 + \sum e \right) \cdot L_M & (108) \\
 &= (2 \cdot 0,05255 + 37 \cdot 0,007) \cdot 0,9 \\
 &= 0,32769 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Prema (10):

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{S_m \cdot S_u} & (109) \\
 &= \sqrt{0,32769 \cdot 0,09818} \\
 &= 0,17937 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Brzina strujanja prema (9) iznosi:

$$\begin{aligned}
 w &= \frac{q_n \cdot M_z}{\rho \cdot S} & (110) \\
 &= \frac{1500}{3600} \cdot \frac{28,96}{5,05 \cdot 0,17937} \\
 &= 13,32 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Reynoldsov broj prema (2) iznosi:

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{w \cdot d_v \cdot \rho}{\mu} & (111) \\
 &= \frac{13,32 \cdot 0,022 \cdot 5,05}{23,14 \cdot 10^{-6}} \\
 &= 63958,2
 \end{aligned}$$

Prandtlov broj prema (3) iznosi:

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda} & (112) \\ &= \frac{23,14 \cdot 10^{-6} \cdot 1,017 \cdot 10^3}{0,03} \\ &= 0,78445 \end{aligned}$$

Nusseltov broj prema (1) iznosi:

$$\begin{aligned} Nu_D &= C \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \cdot f_Q & (113) \\ &= 0,22 \cdot 63958,2^{0,6} \cdot 0,78445^{1/3} \cdot 1 \\ &= 155,1725 \end{aligned}$$

gdje smo konstantu $C = 0,22$ odabrali za neobrađeni plašt, a za faktor f_Q dan izrazom (4) smo pretpostavili da su srednja temperatura medija i stijenke približno jednake:

$$f_Q = \left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_{st}} \right)^{0,14} = 1 \quad (114)$$

Koeficijent prijelaza topline prema Donohue (12) iznosi:

$$\begin{aligned} \alpha_D &= \lambda \cdot \frac{Nu_D}{d_v} & (115) \\ &= 0,03 \cdot \frac{155,1725}{0,022} \\ &= 211,60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

4.2. Proračun prema Gnielinskom

Prema (31):

$$\begin{aligned} t_p &= \frac{s_p}{d_v} & (116) \\ &= \frac{0,029}{0,022} \\ &= 1,3182 \end{aligned}$$

Prema (32):

$$\begin{aligned}
 t_u &= \frac{S_u}{d_v} & (117) \\
 &= \frac{0,025}{0,022} \\
 &= 1,1364
 \end{aligned}$$

Za $t_u \geq 1$ poroznost snopa cijevi prema (41) iznosi:

$$\begin{aligned}
 \psi &= 1 - \frac{\pi}{4 \cdot t_p} & (118) \\
 &= 1 - \frac{\pi}{4 \cdot 1,3182} \\
 &= 0,4042
 \end{aligned}$$

Prema (40) prestrujna dužina cijevi iznosi:

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{d_v \cdot \pi}{2} & (119) \\
 &= \frac{0,022 \cdot \pi}{2} \\
 &= 0,03456 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Prema (39):

$$\begin{aligned}
 S_0 &= D_u \cdot L_M & (120) \\
 &= 1,21 \cdot 0,9 \\
 &= 1,089 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Brzina strujanja u slobodnom presjeku prema (38) iznosi:

$$\begin{aligned}
 w &= \frac{q_n \cdot M_z}{\rho \cdot S_0} & (121) \\
 &= \frac{1500}{3600} \cdot \frac{28,96}{5,05 \cdot 1,089}
 \end{aligned}$$

$$= 2,19 \text{ m/s}$$

Prema (37) Reynoldsov broj iznosi:

$$\begin{aligned} Re &= \frac{w_0 \cdot L \cdot \rho}{\psi \cdot \mu} & (122) \\ &= \frac{2,19 \cdot 0,03456 \cdot 5,05}{0,4042 \cdot 23,14 \cdot 10^{-6}} \\ &= 40941,9 \end{aligned}$$

Prema (35) Nusseltov broj za laminarno strujanje iznosi:

$$\begin{aligned} Nu_l &= 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3} & (123) \\ &= 0,664 \cdot 40941,9^{0,5} \cdot 0,78445^{1/3} \\ &= 123,91 \end{aligned}$$

Prema (36) Nusseltov broj za turbulentno strujanje iznosi:

$$\begin{aligned} Nu_t &= \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + \frac{2,443}{Re^{0,1}} \cdot (Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} & (124) \\ &= \frac{0,037 \cdot 40941,9^{0,8} \cdot 0,78445}{1 + \frac{2,443}{40941,9^{0,1}} \cdot (0,78445^{\frac{2}{3}} - 1)} \\ &= 162,59 \end{aligned}$$

Prema (34):

$$\begin{aligned} Nu &= [0,3 + (Nu_l^2 + Nu_t^2)^{0,5}] \cdot f_Q & (125) \\ &= [0,3 + (123,91^2 + 162,59^2)^{0,5}] \cdot 1 \\ &= 204,72 \end{aligned}$$

Prema (30):

$$f_s = f_{\text{s}} = 1 + \frac{2}{3 \cdot t_u} \quad (126)$$

$$= 1 + \frac{2}{3 \cdot 1,1364}$$

$$= 1,5867$$

Prema (27) Nusseltov broj kod idealnog poprečno nastrujanog aparata za $z_p \geq 10$ iznosi:

$$Nu_{SG} = f_s \cdot Nu \quad (127)$$

$$= 1,5867 \cdot 204,72$$

$$= 324,83$$

Korekcijski faktor f_s prema (15) iznosi:

$$f_s = 1 - 2 \cdot \frac{N_U}{N} + 0,654 \cdot \left(\frac{N_U}{N}\right)^{0,32} \quad (128)$$

$$= 1 - 2 \cdot \frac{228}{1214} + 0,654 \cdot \left(\frac{228}{1214}\right)^{0,32}$$

$$= 1,007$$

a koji zadovoljava područje:

$$0,2 \leq \frac{L_M}{D_u} \leq 1 \quad ; \quad \frac{L_M}{D_u} = \frac{0,9}{1,21} = 0,7438$$

$$0 \leq \frac{N_U}{N} \leq 0,8 \quad ; \quad \frac{N_U}{N} = \frac{228}{1214} = 0,1878$$

Prema (19):

za $e = 0,007\text{m} < D_U - D_C = 1,21 - 1,145 = 0,065\text{m}$

$$S_B = (D_U - D_C - e) \cdot L_K \quad (129)$$

$$= (1,21 - 1,145 - 0,007) \cdot 1$$

$$= 0,058 \text{ m}^2$$

Prema (18):

$$\begin{aligned}
 R_B &= \frac{S_B}{S_M} & (130) \\
 &= \frac{0,058}{0,32769} \\
 &= 0,177
 \end{aligned}$$

Korekcijski faktor f_B prema (16) iznosi:

za $z_B = 0 < z_K = 29,5$

$$\begin{aligned}
 f_B &= \exp \left[-C_B \cdot R_B \cdot \left(1 - \sqrt[3]{\frac{z_B}{z_K}} \right) \right] & (131) \\
 &= \exp \left[-1,35 \cdot 0,177 \cdot \left(1 - \sqrt[3]{\frac{0}{29,5}} \right) \right] \\
 &= 0,7875
 \end{aligned}$$

Prema (23):

$$\begin{aligned}
 S_{L,C} &= (N - N_U) \cdot \frac{(d_B^2 - d_v^2) \cdot \pi}{4} & (132) \\
 &= (1214 - 228) \cdot \frac{(0,023^2 - 0,022^2) \cdot \pi}{4} \\
 &= 0,03485 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Prema (25):

$$\begin{aligned}
 S_{L,PS} &= \frac{(D_u^2 - D_s^2) \cdot \pi}{4} \cdot \frac{360 - \gamma}{360} & (133) \\
 &= \frac{(1,21^2 - 1,194^2) \cdot \pi}{4} \cdot \frac{360 - 111,266}{360} \\
 &= 0,02087 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Prema (24):

$$S_L = S_{L,C} + S_{L,PS} \quad (134)$$

$$= 0,03485 + 0,02087$$

$$= 0,05572 \text{ m}^2$$

Prema (26):

$$R_L = \frac{S_L}{S_M} \tag{135}$$

$$= \frac{0,05572}{0,32769}$$

$$= 0,17$$

Prema (22):

$$R_C = \frac{S_{L,C}}{S_L} \tag{136}$$

$$= \frac{0,03485}{0,05572}$$

$$= 0,62545$$

Korekcijski faktor f_L prema (21) iznosi:

za $R_L = 0,17 \leq 0,80$

$$f_L = 0,4 \cdot R_C + (1 - 0,4 \cdot R_C) \cdot \exp(-1,5 \cdot R_L) \tag{137}$$

$$= 0,4 \cdot 0,62545 + (1 - 0,4 \cdot 0,62545) \cdot \exp(-1,5 \cdot 0,17)$$

$$= 0,8312$$

Korekcijski faktor f_A , koji uzima u obzir odstupanje između idealnog i realnog aparata prema (14) iznosi:

$$f_A = f_S \cdot f_B \cdot f_L \tag{138}$$

$$= 1,007 \cdot 0,7875 \cdot 0,8312$$

$$= 0,659$$

Nusseltov broj prema Gnielinskom vrijedi za područje:

$$10 \leq Re = 40941,9 \leq 10^6$$

$$f_A = 0,659 \geq 0,30$$

$$0,6 \leq Pr = 0,784 \leq 10^3$$

koje je zadovoljeno.

Prema (13):

$$\begin{aligned} Nu_G &= f_A \cdot Nu_{SG} & (139) \\ &= 0,659 \cdot 324,83 \\ &= 214,17 \end{aligned}$$

Koeficijent prijelaza topline prema Gnielinskom (43) iznosi:

$$\begin{aligned} \alpha_G &= \lambda \cdot \frac{Nu_G}{L} & (140) \\ &= 0,03 \cdot \frac{214,17}{0,03456} \\ &= 185,91 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

4.3. Proračun prema Slipčeviću

Broj cijevi u pojedinim redovima:

$$N_1 = 16$$

$$N_2 = N_{21} = 33$$

$$N_3 = N_{20} = 34$$

$$N_4 = N_{19} = 35$$

$$N_5 = N_{18} = 36$$

$$N_6 = N_{17} = 37$$

$$N_7 = N_{16} = 38$$

$$N_8 = N_{15} = 37$$

$$N_9 = N_{14} = 38$$

$$N_{10} = N_{13} = 37$$

$$N_{11} = N_{12} = 38$$

$$N_{22} = 32$$

$$N_{23} = 31$$

$$N_{24} = 30$$

$$N_{25} = 29$$

$$N_{26} = 28$$

$$N_{27} = 27$$

$$N_{28} = 24$$

$$N_{29} = 23$$

$$N_{30} = 20$$

$$N_{22M} = 16$$

Slobodni presjeci pojedinih poprečno nastrojanih redova cijevi prema (54):

$$S_i = (D_i - N_i \cdot d_v) \cdot L_{M,K} \quad (141)$$

Prema (55):

$$D_i = 2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma_i \cdot \pi}{2 \cdot 180}\right) \cdot \frac{D_u}{2} \quad (142)$$

Prema (56):

$$\gamma_i = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot H_i}{D_s}\right) \quad (143)$$

Red 1:

$$H_1 = 0,260m ; \gamma_1 = 111,266^\circ ; D_1 = 0,999m ; S_1 = 0,295m^2 ; S_{1M} = \frac{S_1}{2} = 0,1475m^2$$

Red 2:

$$H_2 = 0,285m ; \gamma_2 = 116,985^\circ ; D_2 = 1,032m ; S_2 = 0,306m^2$$

Red 3:

$$H_3 = 0,310m ; \gamma_3 = 122,533^\circ ; D_3 = 1,061m ; S_3 = 0,313m^2$$

Red 4:

$$H_4 = 0,335m ; \gamma_4 = 127,938^\circ ; D_4 = 1,087m ; S_4 = 0,317m^2$$

Red 5:

$$H_5 = 0,360m ; \gamma_5 = 133,220^\circ ; D_5 = 1,111m ; S_5 = 0,319m^2$$

Red 6:

$$H_6 = 0,385m ; \gamma_6 = 138,400^\circ ; D_6 = 1,131m ; S_6 = 0,317m^2$$

Red 7:

$$H_7 = 0,410m ; \gamma_7 = 143,492^\circ ; D_7 = 1,149m ; S_7 = 0,313m^2$$

Red 8:

$$H_8 = 0,435m ; \gamma_8 = 148,510^\circ ; D_8 = 1,165m ; S_8 = 0,351m^2$$

Red 9:

$$H_9 = 0,460m ; \gamma_9 = 153,467^\circ ; D_9 = 1,178m ; S_9 = 0,342m^2$$

Red 10:

$$H_{10} = 0,485m ; \gamma_{10} = 158,374^\circ ; D_{10} = 1,188m ; S_{10} = 0,375m^2$$

Red 11:

$$H_{11} = 0,510m ; \gamma_{11} = 163,241^\circ ; D_{11} = 1,197m ; S_{11} = 0,361m^2$$

Red 12:

$$H_{12} = 0,510m ; \gamma_{12} = 163,241^\circ ; D_{12} = 1,197m ; S_{12} = 0,361m^2$$

Red 13:

$$H_{13} = 0,485m ; \gamma_{13} = 158,374^\circ ; D_{13} = 1,188m ; S_{13} = 0,375m^2$$

Red 14:

$$H_{14} = 0,460m ; \gamma_{14} = 153,467^\circ ; D_{14} = 1,178m ; S_{14} = 0,342m^2$$

Red 15:

$$H_{15} = 0,435m ; \gamma_{15} = 148,510^\circ ; D_{15} = 1,165m ; S_{15} = 0,351m^2$$

Red 16:

$$H_{16} = 0,410m ; \gamma_{16} = 143,492^\circ ; D_{16} = 1,149m ; S_{16} = 0,313m^2$$

Red 17:

$$H_{17} = 0,385m ; \gamma_{17} = 138,400^\circ ; D_{17} = 1,131m ; S_{17} = 0,317m^2$$

Red 18:

$$H_{18} = 0,360m ; \gamma_{18} = 133,220^\circ ; D_{18} = 1,111m ; S_{18} = 0,319m^2$$

Red 19:

$$H_{19} = 0,335m ; \gamma_{19} = 127,938^\circ ; D_{19} = 1,087m ; S_{19} = 0,317m^2$$

Red 20:

$$H_{20} = 0,310m ; \gamma_{20} = 122,533^\circ ; D_{20} = 1,061m ; S_{20} = 0,313m^2$$

Red 21:

$$H_{21} = 0,285m ; \gamma_{21} = 116,985^\circ ; D_{21} = 1,032m ; S_{21} = 0,306m^2$$

Red 22:

$$H_{22} = 0,260m ; \gamma_{22} = 111,266^\circ ; D_{22} = 0,999m ; S_{22} = 0,295m^2 ; S_{22M} = \frac{S_{22}}{2} = 0,1475m^2$$

Red 23:

$$H_{23} = 0,235m ; \gamma_{23} = 105,346^\circ ; D_{23} = 0,962m ; S_{23} = 0,280m^2$$

Red 24:

$$H_{24} = 0,210m ; \gamma_{24} = 99,182^\circ ; D_{24} = 0,921m ; S_{24} = 0,261m^2$$

Red 25:

$$H_{25} = 0,185m ; \gamma_{25} = 92,721^\circ ; D_{25} = 0,876m ; S_{25} = 0,238m^2$$

Red 26:

$$H_{26} = 0,160m ; \gamma_{26} = 85,892^\circ ; D_{26} = 0,824m ; S_{26} = 0,208m^2$$

Red 27:

$$H_{27} = 0,135m ; \gamma_{27} = 78,595^\circ ; D_{27} = 0,766m ; S_{27} = 0,172m^2$$

Red 28:

$$H_{28} = 0,110m ; \gamma_{28} = 70,678^\circ ; D_{28} = 0,700m ; S_{28} = 0,172m^2$$

Red 29:

$$H_{29} = 0,085m ; \gamma_{29} = 61,899^\circ ; D_{29} = 0,622m ; S_{29} = 0,116m^2$$

Red 30:

$$H_{30} = 0,060m ; \gamma_{29} = 51,816^\circ ; D_{29} = 0,529m ; S_{29} = 0,089m^2$$

KRAJNJA ZONA:

Prema (53):

$$S_K = \left(\frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 +}{S_1^{0,6} + S_2^{0,6} + S_3^{0,6} + S_4^{0,6} + S_5^{0,6} + S_6^{0,6} + S_7^{0,6} + S_8^{0,6} + S_9^{0,6} +} \right. \quad (144)$$

$$\frac{N_{10} + N_{11} + N_{12} + N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16} + N_{17} + N_{18} + N_{19} + N_{20} +}{S_{10}^{0,6} + S_{11}^{0,6} + S_{12}^{0,6} + S_{13}^{0,6} + S_{14}^{0,6} + S_{15}^{0,6} + S_{16}^{0,6} + S_{17}^{0,6} + S_{18}^{0,6} + S_{19}^{0,6} + S_{20}^{0,6} +}$$

$$\left. \frac{N_{21} + N_{22} + N_{23} + N_{24} + N_{25} + N_{26} + N_{27} + N_{28} + N_{29} + N_{30}}{S_{21}^{0,6} + S_{22}^{0,6} + S_{23}^{0,6} + S_{24}^{0,6} + S_{25}^{0,6} + S_{26}^{0,6} + S_{27}^{0,6} + S_{28}^{0,6} + S_{29}^{0,6} + S_{30}^{0,6}} \right)^{5/3}$$

$$= \left(\frac{16 + 33 + 34 + 35 + 36 + 37 +}{\frac{16}{0,295^{0,6}} + \frac{33}{0,306^{0,6}} + \frac{34}{0,313^{0,6}} + \frac{35}{0,317^{0,6}} + \frac{36}{0,319^{0,6}} + \frac{37}{0,317^{0,6}} +} \right)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{38 + 37 + 38 + 37 + 38 + 38 +}{0,313^{0,6} + \frac{37}{0,351^{0,6}} + \frac{38}{0,342^{0,6}} + \frac{37}{0,375^{0,6}} + \frac{38}{0,361^{0,6}} + \frac{38}{0,361^{0,6}} +} \\
& \frac{37 + 38 + 37 + 38 + 37 + 36 +}{0,375^{0,6} + \frac{38}{0,342^{0,6}} + \frac{37}{0,351^{0,6}} + \frac{38}{0,313^{0,6}} + \frac{37}{0,317^{0,6}} + \frac{36}{0,319^{0,6}} +} \\
& \frac{35 + 34 + 33 + 32 + 31 + 30 +}{0,317^{0,6} + \frac{34}{0,313^{0,6}} + \frac{33}{0,306^{0,6}} + \frac{32}{0,259^{0,6}} + \frac{31}{0,280^{0,6}} + \frac{30}{0,261^{0,6}} +} \\
& \left. \frac{29 + 28 + 27 + 24 + 23 + 20}{0,238^{0,6} + \frac{28}{0,208^{0,6}} + \frac{27}{0,172^{0,6}} + \frac{24}{0,172^{0,6}} + \frac{23}{0,116^{0,6}} + \frac{20}{0,089^{0,6}}}\right)^{5/3} \\
& = 0,284 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

Prema (52):

$$\begin{aligned}
w_K &= \frac{q_n \cdot M_z}{\rho \cdot S_K} & (145) \\
&= \frac{1500}{3600} \cdot 28,96 \\
&= 5,05 \cdot 0,284 \\
&= 8,424 \text{ m/s}
\end{aligned}$$

Prema (51):

$$\begin{aligned}
Re_K &= \frac{w_K \cdot d_v \cdot \rho}{\mu} & (146) \\
&= \frac{8,414 \cdot 0,022 \cdot 5,05}{23,14 \cdot 10^{-6}} \\
&= 40446,8
\end{aligned}$$

Prema (50):

$$\begin{aligned}
Nu_K &= C \cdot Re_K^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \cdot f_Q & (147) \\
&= 0,45 \cdot 40446,8^{0,6} \cdot 0,78445^{1/3} \cdot 1 \\
&= 241,10
\end{aligned}$$

$C = C_{\xi} = 0,45$ – konstanta za šahovski raspored cijevi

Prema (46) srednji koeficijent prijelaza topline :

$$\begin{aligned}\alpha_K &= \lambda \cdot \frac{Nu_K}{d_v} & (148) \\ &= 0,03 \cdot \frac{241,10}{0,022} \\ &= 328,77 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})\end{aligned}$$

Ukupan broj cijevi u krajnjoj zoni:

$$\begin{aligned}N_K &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 + N_{10} + N_{11} + & (149) \\ &N_{12} + N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16} + N_{17} + N_{18} + N_{19} + N_{20} + N_{21} + \\ &N_{22} + N_{23} + N_{24} + N_{25} + N_{26} + N_{27} + N_{28} + N_{29} + N_{30} \\ &= 16 + 33 + 34 + 35 + 36 + 37 + 38 + 37 + 38 + 37 + \\ &38 + 38 + 37 + 38 + 37 + 38 + 37 + 36 + 35 + 34 + \\ &33 + 32 + 31 + 30 + 29 + 28 + 27 + 24 + 23 + 20 \\ &= 986\end{aligned}$$

Prema (47):

$$\begin{aligned}A_K &= 2 \cdot N_K \cdot d_v \cdot \pi \cdot L_K & (150) \\ &= 2 \cdot 986 \cdot 0,022 \cdot \pi \cdot 1 \\ &= 136,29 \text{ m}^2\end{aligned}$$

MEĐUZONA:

Prema (53):

$$S_M = \left(\frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 +}{\frac{N_1}{S_{1M}^{0,6}} + \frac{N_2}{S_2^{0,6}} + \frac{N_3}{S_3^{0,6}} + \frac{N_4}{S_4^{0,6}} + \frac{N_5}{S_5^{0,6}} + \frac{N_6}{S_6^{0,6}} + \frac{N_7}{S_7^{0,6}} + \frac{N_8}{S_8^{0,6}} + \frac{N_9}{S_9^{0,6}} +} \right) & (151)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{N_{10} + N_{11} + N_{12} + N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16} + N_{17} + N_{18} +}{S_{10}^{0,6} + S_{11}^{0,6} + S_{12}^{0,6} + S_{13}^{0,6} + S_{14}^{0,6} + S_{15}^{0,6} + S_{16}^{0,6} + S_{17}^{0,6} + S_{18}^{0,6}} + \\
& \frac{N_{19} + N_{20} + N_{21} + N_{22M}}{S_{19}^{0,6} + S_{20}^{0,6} + S_{21}^{0,6} + S_{22M}^{0,6}})^{5/3} \\
= & \left(\frac{16 + 33 + 34 + 35 + 36 + 37 +}{0,147^{0,6} + 0,306^{0,6} + 0,313^{0,6} + 0,317^{0,6} + 0,319^{0,6} + 0,317^{0,6} +} \right. \\
& \frac{38 + 37 + 38 + 37 + 38 + 38 +}{0,313^{0,6} + 0,351^{0,6} + 0,342^{0,6} + 0,375^{0,6} + 0,361^{0,6} + 0,361^{0,6} +} \\
& \frac{37 + 38 + 37 + 38 + 37 + 36 +}{0,375^{0,6} + 0,342^{0,6} + 0,351^{0,6} + 0,313^{0,6} + 0,317^{0,6} + 0,319^{0,6} +} \\
& \left. \frac{35 + 34 + 33 + 16}{0,317^{0,6} + 0,313^{0,6} + 0,306^{0,6} + 0,147^{0,6}} \right)^{5/3} \\
= & 0,502 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

Prema (52):

$$\begin{aligned}
w_M &= \frac{q_n \cdot M_z}{\rho \cdot S_M} & (152) \\
&= \frac{1500}{3600} \cdot 28,96 \\
&= 5,05 \cdot 0,502 \\
&= 4,764 \text{ m/s}
\end{aligned}$$

Prema (51):

$$\begin{aligned}
Re_M &= \frac{w_M \cdot d_v \cdot \rho}{\mu} & (153) \\
&= \frac{4,764 \cdot 0,022 \cdot 5,05}{23,14 \cdot 10^{-6}} \\
&= 22871,8
\end{aligned}$$

Prema (50):

$$\begin{aligned} Nu_M &= C \cdot Re_M^{0,6} \cdot Pr^{1/3} \cdot f_Q & (154) \\ &= 0,45 \cdot 22871,8^{0,6} \cdot 0,78445^{1/3} \cdot 1 \\ &= 171,26 \end{aligned}$$

Prema (46) srednji koeficijent prijelaza topline:

$$\begin{aligned} \alpha_M &= \lambda \cdot \frac{Nu_M}{d_v} & (155) \\ &= 0,03 \cdot \frac{171,26}{0,022} \\ &= 233,53 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

Ukupan broj cijevi u međuzoni:

$$\begin{aligned} N_M &= N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 + N_7 + N_8 + N_9 + N_{10} + N_{11} + & (156) \\ &N_{12} + N_{13} + N_{14} + N_{15} + N_{16} + N_{17} + N_{18} + N_{19} + N_{20} + N_{21} + N_{22M} \\ &= 16 + 33 + 34 + 35 + 36 + 37 + 38 + 37 + 38 + 37 + 38 + \\ &38 + 37 + 38 + 37 + 38 + 37 + 36 + 35 + 34 + 33 + 16 \\ &= 758 \end{aligned}$$

Prema (48):

$$\begin{aligned} A_M &= N_M \cdot d_v \cdot \pi \cdot (B_b - 1) \cdot L_M & (157) \\ &= 758 \cdot 0,022 \cdot \pi(5 - 1) \cdot 0,9 \\ &= 188,60 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

UZDUŽNA ZONA:

Prema (7):

$$\begin{aligned}
 S_U &= \frac{Du^2}{8} \cdot \left(\frac{\gamma \cdot \pi}{180} - \sin\gamma \right) - N_U \cdot \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} & (158) \\
 &= \frac{1,21^2}{8} \cdot \left(\frac{111,266 \cdot \pi}{180} - \sin(111,26^\circ) \right) - 228 \cdot \frac{0,022^2 \cdot \pi}{4} \\
 &= 0,445 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Prema (52):

$$\begin{aligned}
 w_U &= \frac{q_n \cdot M_z}{\rho \cdot S_U} & (159) \\
 &= \frac{1500}{3600} \cdot 28,96 \\
 &= \frac{5,05 \cdot 0,445}{5,05 \cdot 0,445} \\
 &= 5,364 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Prema (59):

$$\begin{aligned}
 d_{hU} &= d_v \cdot \left[\left(2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{t_p^2}{\pi} \right) - 1 \right] & (160) \\
 &= 0,022 \cdot \left[\left(2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{1,3182^2}{\pi} \right) - 1 \right] \\
 &= 0,02015 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Prema (58):

$$\begin{aligned}
 Re_U &= \frac{w_U \cdot d_{hU} \cdot \rho}{\mu} & (161) \\
 &= \frac{5,364 \cdot 0,02015 \cdot 5,05}{23,14 \cdot 10^{-6}} \\
 &= 23583,1
 \end{aligned}$$

Prema (57):

$$\begin{aligned}
 Nu_U &= (0,0122 + 0,00245 \cdot t_p) \cdot Re^{0,86} \cdot Pr^{0,4} & (162) \\
 &= (0,0122 + 0,00245 \cdot 1,3182) \cdot 23583,1^{0,86} \cdot 0,78445^{0,4}
 \end{aligned}$$

$$= 80,65$$

Prema (46):

$$\alpha_U = \lambda \cdot \frac{Nu_U}{d_{hU}} \quad (163)$$

$$= 0,03 \cdot \frac{80,65}{0,02015}$$

$$= 120,07 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Ukupan broj cijevi u uzdužnoj zoni:

$$N_U = N_{22M} + N_{23} + N_{24} + N_{25} + N_{26} + N_{27} + N_{28} + N_{29} + N_{30} \quad (164)$$

$$= 16 + 31 + 30 + 29 + 28 + 27 + 24 + 23 + 20$$

$$= 228$$

Prema (49):

$$A_U = 2 \cdot N_U \cdot d_v \cdot \pi \cdot L_K + 2 \cdot (N_b - 1) \cdot d_v \cdot \pi \cdot L_M \quad (165)$$

$$= 2 \cdot 228 \cdot 0,022 \cdot \pi \cdot 1 + 2 \cdot (5 - 1) \cdot 0,022 \cdot \pi \cdot 0,9$$

$$= 144,98 \text{ m}^2$$

Prema (45) srednji koeficijent prijelaza topline idealnog aparata :

$$\alpha_{id_S} = \frac{\alpha_K \cdot A_K + \alpha_M \cdot A_M + \alpha_U \cdot A_U}{A_K + A_M + A_U} \quad (166)$$

$$= \frac{328,77 \cdot 136,29 + 233,53 \cdot 188,60 + 120,07 \cdot 144,98}{136,29 + 188,60 + 144,98}$$

$$= 226,15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Prema (44) koeficijent prijelaza topline realnog aparata iznosi:

$$\alpha_S = \alpha_{id_S} \cdot f_B \cdot f_L \quad (167)$$

$$= 226,15 \cdot 0,7875 \cdot 0,8312$$

$$= 148,02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

4.4. Proračun prema Bell-Delaware

Prema metodi Bell-Delaware je proveden proračun za najčešće vrijednosti korekcijskih faktora prema tablici (1).

Prema (63):

$$\begin{aligned}
 S_p &= L_M \cdot \left[(D_u - D_c) + (D_c - d_v) \cdot \frac{S_u - d_v}{S_u} \right] & (168) \\
 &= 0,9 \cdot \left[(1,21 - 1,145) + (1,145 - 0,022) \cdot \frac{0,025 - 0,022}{0,025} \right] \\
 &= 0,1798 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Prema (94):

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{d_v \cdot q_n \cdot M_z}{\mu \cdot S_p} & (169) \\
 &= \frac{0,022 \cdot \frac{1500}{3600} \cdot 28,96}{23,14 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1798} \\
 &= 63805,3
 \end{aligned}$$

Prema tablici 2 vrijednosti konstanti a_1, a_2, a_3, a_4 za kut 30° i Reynoldsov broj $10^4 - 10^5$ iznose:

$$a_1 = 0,321$$

$$a_2 = -0,388$$

$$a_3 = 1,450$$

$$a_4 = 0,519$$

Prema (93):

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{a_3}{1 + 0,14 \cdot Re^{a_4}} & (170) \\
 &= \frac{1,450}{1 + 0,14 \cdot 63805,3^{0,519}}
 \end{aligned}$$

$$= 0,0325$$

Prema (92):

$$j_i = a_1 \cdot \left(\frac{1,33}{s_u/d_v} \right)^a \cdot Re^{a_2} \quad (171)$$

$$= 0,321 \cdot \left(\frac{1,33}{0,025/0,022} \right)^{0,0325} \cdot 63805,3^{-0,388}$$

$$= 0,00441$$

Prema (61):

$$\alpha_{id_B} = j_i \cdot c_p \cdot \frac{q_n \cdot M_z}{S_p} \cdot Pr^{-2/3} \quad (172)$$

$$= 0,00441 \cdot 1017 \cdot \frac{1500}{0,1798} \cdot 0,78445^{-2/3}$$

$$= 353,87 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Prema (60):

$$\alpha_B = \alpha_{id_B} \cdot (J_c \cdot J_l \cdot J_b \cdot J_r \cdot J_s) \quad (173)$$

$$= 353,87 \cdot 0,6$$

$$= 212,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

4.5. Analiza rezultata

Koeficijent prijelaza topline prema Donohue iznosi:

$$\alpha_D = 211,60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Koeficijent prijelaza topline prema Gnielinskom iznosi:

$$\alpha_G = 185,91 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

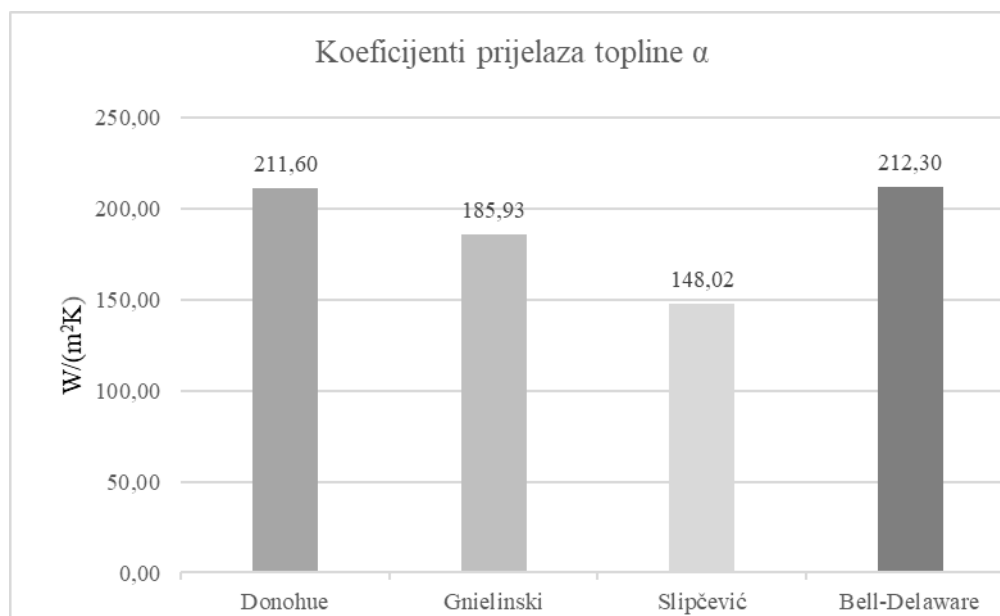
Koeficijent prijelaza topline prema Slipčeviću iznosi:

$$\alpha_S = 148,02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Koeficijent prijelaza topline prema Bell-Delaware iznosi:

$$\alpha_B = 212,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Na [Slika 18] su pomoću dijagrama prikazane vrijednosti dobivenih koeficijenata prijelaza topline u plaštu aparata pomoću četiri obrađene metode. Vidimo da je prema metodi Bell-Dellaware dobivena najveća vrijednost koeficijenta prijelaza topline, dok je prema Slipčeviću dobivena najmanja vrijednost. Razlika između najvećeg i najmanjeg dobivenog rezultata koeficijenta prijelaza topline je oko 30 %. Na razlike među metodama utječu primijenjeni korekcijski faktori koje je pojedini autor uključio u proračun, kako bi sve specifičnosti realnog aparata uzeo u obzir.



Slika 18. Prikaz koeficijenata prijelaza topline po metodama

5. PRORAČUN PRIJELAZA TOPLINE U CIJEVIMA CIJEVNOG SNOPA

Fizikalna svojstva radnog medija (vode) koji struji kroz cijevi, su odabrana za srednju temperaturu

$$\vartheta_{sr} = \vartheta_{ulv} = 25^{\circ}\text{C} \text{ [13]:}$$

$$q_{m_v} = 70 \text{ kg/s} - \text{maseni protok vode}$$

$$p_v = 1 \text{ bar} - \text{tlak vode}$$

$$\vartheta_{ulv} = 25^{\circ}\text{C} - \text{ulazna temperature vode}$$

$$\rho_v = 997,05 \text{ kg/m}^3 - \text{gustoća vode}$$

$$c_{p_v} = 4181,9 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} - \text{specifični toplinski kapacitet vode}$$

$$\mu_v = 890,08 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} - \text{koeficijent dinamičke žilavosti vode}$$

$$\lambda_v = 0,6072 \text{ W/(m} \cdot \text{K)} - \text{toplinska provodnost vode}$$

Maseni protok vode kroz jednu cijev:

$$\begin{aligned} q_{m_{v,c}} &= \frac{q_{m_v}}{N} & (174) \\ &= \frac{70}{1214} \\ &= 0,0577 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Prema (97):

$$\begin{aligned} Re &= \frac{4 \cdot q_{m_{v,c}}}{d_u \cdot \pi \cdot \mu_v} & (175) \\ &= \frac{4 \cdot 0,0577}{0,022 \cdot \pi \cdot 890,08 \cdot 10^{-6}} \\ &= 3751,7 \end{aligned}$$

Prema (98):

$$\begin{aligned}
 Pr &= \frac{\mu_v \cdot c_{pv}}{\lambda_v} & (176) \\
 &= \frac{890,08 \cdot 10^{-6} \cdot 4181,9}{0,6072} \\
 &= 6,130
 \end{aligned}$$

Prema (100):

$$\begin{aligned}
 f_G &= 1 + \sqrt[3]{\left(\frac{d_u}{L}\right)^2} & (177) \\
 &= 1 + \sqrt[3]{\left(\frac{0,02}{5,6}\right)^2} \\
 &= 1,023
 \end{aligned}$$

Prema (101):

$$\begin{aligned}
 f_Q &= \left(\frac{Pr_{sr}}{Pr_{st}}\right)^{0,14} & (178) \\
 &= 1
 \end{aligned}$$

Prema (99):

$$\begin{aligned}
 Nu_T &= 0,0235 \cdot \left(Re^{\frac{4}{5}} - 230\right) \cdot \left(1,8 \cdot Pr^{\frac{3}{10}} - 0,8\right) \cdot f_G \cdot f_Q & (179) \\
 &= 0,0235 \cdot \left(3751,7^{\frac{4}{5}} - 230\right) \cdot \left(1,8 \cdot 6,130^{\frac{3}{10}} - 0,8\right) \cdot 1,023 \cdot 1 \\
 &= 27,3
 \end{aligned}$$

Prema (103) koeficijent prijelaza topline kroz cijevi iznosi:

$$\begin{aligned}
 \alpha_u &= \frac{Nu_T \cdot \lambda_v}{d_u} & (180) \\
 &= \frac{27,3 \cdot 0,6072}{0,02} \\
 &= 828,83 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})
 \end{aligned}$$

6. KOEFICIJENT PROLAZA TOPLINE U IZMJENJIVAČU TOPLINE

Koeficijent prolaza topline izmjenjivača k_v , sveden na površinu vanjske plohe cijevi $A_v = N \cdot d_v \cdot \pi \cdot L$ [1]:

$$k_v = \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_{D,G,S,B}}} \quad (181)$$

Toplinska provodnost za bakrene cijevi iznosi $\lambda_{Cu} = 372 \text{ W/(m K)}$. [13]

Koeficijent prolaza topline za $\alpha_D = 211,60 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$:

$$\begin{aligned} k_{vD} &= \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_D}} \quad (182) \\ &= \frac{1}{\frac{0,022}{0,02 \cdot 828,83} + \frac{0,022}{2 \cdot 372} \ln \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{211,60}} \\ &= 165,13 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

Koeficijent prolaza topline za $\alpha_G = 185,93 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$:

$$\begin{aligned} k_{vG} &= \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_G}} \quad (183) \\ &= \frac{1}{\frac{0,022}{0,02 \cdot 828,83} + \frac{0,022}{2 \cdot 372} \ln \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{185,93}} \\ &= 149,07 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

Koeficijent prolaza topline za $\alpha_S = 148,02 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$:

$$\begin{aligned} k_{vS} &= \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_S}} \quad (184) \\ &= \frac{1}{\frac{0,022}{0,02 \cdot 828,83} + \frac{0,022}{2 \cdot 372} \ln \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{148,02}} \\ &= 123,67 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

Koeficijent prolaza topline za $\alpha_G = 212,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$:

$$\begin{aligned}k_{v_B} &= \frac{1}{\frac{d_v}{d_u \cdot \alpha_u} + \frac{d_v}{2 \cdot \lambda_{Cu}} \ln \frac{d_v}{d_u} + \frac{1}{\alpha_B}} & (185) \\ &= \frac{1}{\frac{0,022}{0,02 \cdot 828,83} + \frac{0,022}{2 \cdot 372} \ln \frac{0,022}{0,02} + \frac{1}{212,30}} \\ &= 165,55 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})\end{aligned}$$

Iz dobivenih koeficijenata prolaza topline vidimo da su veći za veće koeficijente prijelaza topline, pa je time veći i učin izmjenjivača.

7. ZAKLJUČAK

Za definiranu geometriju izmjenjivača topline sa segmentnim pregradama i zadane ulazne parametre struja, provedena je analiza prijelaza topline u plaštu izmjenjivača. Analiza je provedena prema četiri metode različitih autora. Prvo je proveden proračun po metodi prema Donohue koja se smatra najjednostavnijom metodom, te je dobiven koeficijent prijelaza topline $\alpha_D = 211,60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Zatim je proveden proračun po metodi prema Gnielinskom koji je u svojem proračunu primijenio korekcijske faktore koji uzimaju u obzir utjecaj uzdužnog strujanja, smanjenja prijelaza topline uslijed obilaznog strujanja, smanjenje prijelaza topline uslijed lekažnog strujanja, te je uzeo u obzir i raspored cijevi unutar plašta aparata. Prema njegovoj metodi je dobiven nešto manji koeficijent prijelaza topline $\alpha_G = 185,91 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Zatim je proveden proračun prema Slipčeviću koji uzima u obzir utjecaj promjenljive brzine strujanja u pojedinim redovima snopa cijevi, te uzima kao i Gnielinski korekcijske faktore za smanjenje prijelaza topline uslijed obilaznog i lekažnog strujanja. Prema njegovoj metodi je dobiven najmanji koeficijent prijelaza topline, a iznosi $\alpha_S = 148,02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Zadnja metoda je provedena prema Bellu i smatra se najkompleksnijom metodom. Bell je u svojem proračunu primijenio korekcijske faktore za presjek segmentne pregrade, za efekt propuštanja segmentne pregrade, za obilazno strujanje oko snopa cijevi, za laminarno strujanje, te za nejednolik razmak između segmentnih pregrada u krajnjoj zoni i međuzoni. Prema njegovoj metodi je pak dobiven najveći koeficijent prijelaza topline $\alpha_B = 212,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, pri čemu korekcijski faktori nisu zasebno proračunavani za zadani slučaj, već su uzete njihove preporučene vrijednosti.

Kada bi za istu geometriju i iste ulazne parametre struja analizirali izmjenjivač topline bez segmentnih pregrada proračun pokazuje da bi dobivena vrijednost koeficijenta prijelaza topline iznosila oko $\alpha = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Slijedom dobivenih rezultata može se zaključiti da je koeficijent prijelaza topline u izmjenjivačima topline sa segmentnim pregradama 15-20 puta veći nego kod izmjenjivača bez segmentnih pregrada. Ovi rezultati potvrđuju smisao ugradnje segmentnih pregrada u izmjenjivače topline (osobito kada je na strani plašta plinoviti medij), jer to rezultira povećanjem brzine strujanja, boljim miješanjem čestica fluida radnog medija, a time i većim koeficijentima prijelaza topline.

LITERATURA

1. Galović, A.: *Termodinamika II*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
2. Halasz, B.: *Uvod u termodinamiku*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
3. Slipčević, B.: *Razmjenjivači topline sa primjerima iz rashladne tehnike*, Izdanje Saveza mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara (SMEITS), Beograd, 1989.
4. Đurak, T.: *Izmjenjivač topline vlažni zrak/voda-sušač zraka (diplomski rad)*, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
5. VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (VDI-GVC): *VDI Heat Atlas*, Springer, Berlin, 2010.
6. Anand, K., Pravin, V.K., Veena, P.H.: *Experimental Investigation of Shell and Tube Heat Exchanger Using Bell Delaware Method*, IJRASET, 2(2014)1, 73-85.
7. *SHELL & TUBE HEAT EXCHANGER DESIGN*, <http://me1065.wdfiles.com/local--files/handouts-and-links/shellandtube.pdf>, 01.12.2020.
8. Prasanna, J, H. R. Purushothama, Devaraj K, Murugesan: *A numerical analysis of hydrodynamic and heat transfer effects of shell-and-tube heatexchanger for different baffle space and cut*, Confab Mechanica, 2(2013), 17-36.
9. Thome, J.R.: *The heat transfer engineering data book III*, Faculty of Engineering Science and Tachnology, Switzerland, 2016.
10. *Design and rating of Shell and tube heat Exchangers Bell-Delaware method*, <https://dredgarayalaherrera.files.wordpress.com/2019/06/articulo5.pdf>, 01.12.2020.
11. *Heat Exchanger Rating (Bell-Delaware Method)*, https://cheguide.com/heat_exchanger_rating.html, 01.12.2020.
12. <https://termolab.fsb.hr/nastava/004%20prijelaz%20topline%20%20izmjenjivac.pdf>
13. Halasz, B., Galović, A., Boras, I.: *Toplinske tablice*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.